



Optimalisasi Kendali Adaptif pada *Autonomous Surface Vehicle* Berbasis *Fuzzy Logic*

Tugas Akhir

**Oleh:
Vafin Julianba (4212201053)**

**Program Studi Teknik Mekatronika
Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Batam
2026**

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertandatangan dibawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul : “Optimalisasi Kendali Adaptif pada *Autonomous Surface Vehicle* Berbasis *Fuzzy Logic*” adalah **hasil karya sendiri**, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan, dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip atau dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan saya ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Batam, 23 Desember 2025



Nama : Vafin Julianba

NIM: 4212201053

Lembar Pengesahan

Tugas Akhir disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T)
di
Politeknik Negeri Batam

Oleh:
Vafin Julianba (4212201053)

Tanggal Sidang: 20, 01, 2026

Disetujui oleh :



1. Nama Penguji I
Fadli Firdaus, S.Pd.,M.Pd
NIK: 122271

1. Nama Pembimbing I
Ryan Satria Wijaya, S.Tr.T.,M.Tr.T
NIK: 121249



2. Nama Penguji II
Nanta Fakhri Prebianto, S.ST.,M.Sc
NIK: 117182

Optimalisasi Kendali Adaptif pada *Autonomous Surface Vehicle* Berbasis Fuzzy Logic

Abstrak

Operasi *Autonomous Surface Vehicle* (ASV) di lingkungan perairan dinamis sering menghadapi tantangan berupa gangguan arus dan gelombang yang menyebabkan ketidakstabilan arah (*heading*) apabila hanya mengandalkan kontrol PID konvensional dengan parameter tetap. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan dan mengevaluasi sistem kendali adaptif berbasis *Fuzzy Logic* (Fuzzy-PID) guna meningkatkan stabilitas arah dan responsivitas pergerakan ASV. Metode yang diusulkan mengintegrasikan *Fuzzy Inference System* untuk menala parameter PID (K_p , K_i , K_d) secara *real-time* berdasarkan masukan *error* dan *delta error* dari sensor IMU. Pengujian dilakukan melalui serangkaian skenario yang meliputi kondisi statis (*station keeping*), gerak lurus (*forward*), manuver belok, serta uji ketahanan terhadap gangguan gelombang. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode Fuzzy-PID memberikan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan PID konvensional, terutama pada kondisi bergerak. Pada pengujian gerak lurus dengan *setpoint* 45° , Fuzzy-PID mampu mereduksi *overshoot* secara drastis dari 1,60% menjadi 0,51% serta memperkecil *steady state error*. Selain itu, sistem terbukti lebih tangguh (*robust*) dalam meredam osilasi saat menghadapi gangguan eksternal dan manuver. Dapat disimpulkan bahwa kendali adaptif ini efektif dalam mengoptimalkan gerakan ASV pada platform dengan sumber daya terbatas.

Kata kunci: *Autonomous Surface Vehicle* (ASV), *Fuzzy Logic*, *Adaptive PID*.

Optimization of Adaptive Control in Autonomous Surface Vehicles Based on Fuzzy Logic

Abstract

Autonomous Surface Vehicle (ASV) operations in dynamic aquatic environments often face challenges in the form of current and wave disturbances that cause heading instability when relying solely on conventional PID control with fixed parameters. This study aims to implement and evaluate an adaptive control system based on Fuzzy Logic (Fuzzy-PID) to improve the directional stability and responsiveness of ASV movement. The proposed method integrates a Fuzzy Inference System to determine PID parameters (K_p , K_i , K_d) in real time based on error and delta error inputs from the IMU sensor. Testing was conducted through a series of scenarios covering static conditions (station keeping), linear motion (forward), turning manoeuvres, and wave disturbance resistance tests. The experimental results show that the Fuzzy-PID method provides a significant performance improvement compared to conventional PID, especially in moving conditions. In straight motion testing with a setpoint of 45° , Fuzzy-PID was able to drastically reduce overshoot from 1.60% to 0.51% and minimise steady state error. In addition, the system proved to be more robust in dampening oscillations when faced with external disturbances and manoeuvres. It can be concluded that this adaptive control is effective in optimising ASV motion on platforms with limited resources.

Keywords: Autonomous Surface Vehicle (ASV), Fuzzy Logic, Adaptive PID.

Kata Pengantar

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Optimalisasi Kendali Adaptif pada Autonomous Surface Vehicle Berbasis Fuzzy Logic”**.

Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan (D4) pada Program Studi Teknik Mekatronika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam. Penulis menyadari bahwa selesainya laporan ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT, beserta Nabi dan Rasul-Nya atas kelancaran dan serta nikmat yang telah diberikan.
2. Kedua Orang Tua, Kakak dan Keluarga atas jasa, doa, nasehat dan bimbingannya.
3. Bapak Ir. Bambang Hendrawan, ST., MSM., CIPMP., CISCIP. selaku Direktur Politeknik Negeri Batam
4. Bapak Ir. Indra Hardian Mulyadi, S.T., M.Eng., Ph.D selaku Ka. Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Batam.
5. Bapak Diono, S.Tr.T., M.Sc., selaku Ka. Prodi Teknik Mekatronika Politeknik Negeri Batam.
6. Bapak Ryan Satria Wijaya, S.Tr.T., M.Tr.T., selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan serta arahan selama penyusunan Tugas Akhir ini.
7. Bapak Fadli Firdaus, S.Pd., M.Pd. dan Bapak Nanta Fakhri Prebianto, S.ST., M.Sc., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan masukan dan saran demi penyempurnaan alat dan laporan ini.
8. Seluruh Dosen dan Staf Pengajar Program Studi Teknik Mekatronika yang telah memberikan ilmu pengetahuan yang bermanfaat selama masa perkuliahan.
9. Seluruh anggota tim robot BRAIL Politeknik Negeri Batam yang ikut membantu dalam penelitian, terkhususnya divisi KKI BMRT.
10. Rekan-rekan seperjuangan Teknik Mekatronika serta teman-teman angkatan 2022 yang telah saling menyemangati dan berbagi ilmu.
11. Keponakan, Zyandru Kaivan. Penyemangat.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah membantu kelancaran penyusunan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan dikarenakan keterbatasan ilmu dan pengalaman penulis. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Batam, 23 Desember 2025

Vafin Julianba

Daftar Isi

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir	i
Lembar Pengesahan	ii
Abstrak	iii
<i>Abstract</i>	iv
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	x
Daftar Tabel	xi
Daftar Lampiran	xii
Bab 1. Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Manfaat	3
1.5. Batasan	3
Bab 2. Tinjauan Pustaka	4
2.1. <i>Autonomous Surface Vehicle</i> (ASV)	4
2.1.1 Definisi ASV	4
2.1.2 Komponen Utama ASV	4
2.1.3 Aplikasi dan Kemampuan	4
2.1.4 Tantangan	4
2.2 <i>Motion Control</i> Pada <i>Autonomous Surface Vehicle</i> (ASV)	5
2.3 <i>Adaptive PID Controller</i>	5
2.4. <i>Fuzzy Logic Controller</i>	6
2.4.1 Keuntungan dan Keterbatasan <i>Fuzzy Logic</i>	6
2.4.2 Struktur <i>Fuzzy Logic</i>	7
2.4.3 Penelitian Terkait <i>Fuzzy Logic</i> untuk <i>Motion Control</i> pada ASV	8
2.4.4 Implementasi <i>Adaptive Fuzzy-PID</i> dalam <i>Motion Control</i> ASV	8

Bab 3. Metodologi Penelitian	14
3.1. Perancangan Penelitian	14
3.1.1 Perancangan Perangkat Keras (<i>Hardware</i>)	15
3.1.2 Perancangan Perangkat Lunak (<i>Software</i>)	17
3.1.3 Perancangan sistem kontrol <i>Fuzzy-PID</i>	18
3.1.4 Perancangan sistem kontrol PID	19
3.2 Alat dan Bahan	20
3.3. Pengujian	21
3.3.1 Pengujian Implementasi Sistem Kendali <i>Fuzzy Logic</i>	21
3.3.2 Pengujian Stabilitas Arah Hadap ASV	22
3.3.3 Pengujian Respons Pergerakan Arah ASV	24
Bab 4. Hasil dan Pembahasan	25
4.1 Pengujian Sudut Sensor IMU	25
4.2 Pengujian Respons Motor <i>Thruster</i>	26
4.3 Penalaan Parameter PID	27
4.4 Menetapkan Aturan Pengendalian Fuzzy	28
4.5. Data Hasil Penelitian	30
4.5.1 Pengujian Implementasi Sistem Kendali <i>Fuzzy Logic</i>	30
4.5.2 Pengujian Stabilitas <i>Heading</i> ASV	30
4.5.3 Pengujian Respons Manuver <i>Heading</i> ASV	34
4.6. Pembahasan	37
4.6.1 Verifikasi Implementasi Adaptif <i>Fuzzy-PID</i>	37
4.6.2 Efektivitas Adaptasi <i>Gain</i> pada Kondisi Dinamis	37
4.6.3 Analisis Manuver dan Ketahanan Gangguan	38
4.6.4 Pengaruh Non-Linearitas Aktuator dan <i>Deadzone Thruster</i>	38
Bab 5. Kesimpulan dan Saran	39
5.1. Kesimpulan	39
5.2. Saran	39
Daftar Pustaka	40

Biodata	43
Lampiran	44
Lampiran A. Perbandingan Respon Sistem Stabilitas <i>Heading</i>	44
Lampiran B. Perbandingan Respon Sistem Manuver <i>Heading</i>	47
Lampiran C. Perbandingan Respon Sistem Gangguan <i>Heading</i>	48

Daftar Gambar

Gambar 1. Arsitektur Logika <i>Fuzzy</i>	7
Gambar 2. Tahapan Penelitian	14
Gambar 3. <i>Front View</i> ASV	15
Gambar 4. <i>Back View</i> ASV	15
Gambar 5. <i>Side View</i> ASV	15
Gambar 6. Konfigurasi <i>Thruster</i> dan <i>Hull</i>	16
Gambar 7. Blok Diagram Elektrikal.....	16
Gambar 8. Blok Diagram Sistem	17
Gambar 9. Blok Diagram Sistem Metode <i>Fuzzy-PID</i>	18
Gambar 10. Blok Diagram Sistem PID	19
Gambar 11. Orientasi <i>Yaw</i>	25
Gambar 12. Pengujian Sudut <i>Heading</i> ASV	25
Gambar 13. Respons Sinyal <i>Thruster</i> Koreksi Positif	26
Gambar 14. Respons Sinyal <i>Thruster</i> Koreksi Negatif.....	27
Gambar 15. Respon Sistem <i>Heading</i> ASV	28
Gambar 16. Pengujian Stabilitas <i>Heading</i> ASV	30
Gambar 17. Perbandingan Respons Stabilitas <i>Heading (Statis)</i>	31
Gambar 18. Perbandingan Respons Stabilitas <i>Heading (Forward)</i>	32
Gambar 19. Pengujian Manuver <i>Heading</i>	34
Gambar 20. Perbandingan Respons Manuver <i>Heading</i>	35
Gambar 21. Pengujian Gangguan <i>Heading</i>	35
Gambar 22. Perbandingan Respons Gangguan <i>Heading</i>	36

Daftar Tabel

Tabel 1. Penelitian Terkait.....	9
Tabel 2. Estimasi Biaya	20
Tabel 3. Hasil <i>fuzzy</i> untuk mendapatkan K_p , K_i , K_d	21
Tabel 4. Hasil Pengujian Stabilitas <i>Heading (Statis)</i>	23
Tabel 5. Hasil Pengujian Stabilitas <i>Heading (Forward)</i>	23
Tabel 6. Hasil Pengujian Respons <i>Heading (Manuver Heading)</i>	24
Tabel 7. Hasil Pengujian Respons <i>Heading (Gangguan Heading)</i>	24
Tabel 8. Pengujian Sudut IMU	26
Tabel 9. Perencanaan Penyesuaian Kendali Fuzzy K_p	29
Tabel 10. Perencanaan Penyesuaian Kendali Fuzzy K_i	29
Tabel 11. Perencanaan Penyesuaian Kendali Fuzzy K_d	29
Tabel 12. Hasil Fuzzy Untuk Mendapatkan K_p , K_i , K_d	30
Tabel 13. Hasil Pengujian Stabilitas <i>Heading (Statis)</i>	31
Tabel 14. Hasil Pengujian Stabilitas <i>Heading (Forward)</i>	32
Tabel 15. Hasil Pengujian Respons Manuver <i>Heading</i>	34
Tabel 16. Hasil Pengujian Respons Gangguan <i>Heading</i>	36

Daftar Lampiran

Lampiran 1. Perbandingan Respons Stabilitas <i>Heading (Statis) Setpoint 45</i>	44
Lampiran 2. Perbandingan Respons Stabilitas <i>Heading (Statis) Setpoint 90</i>	44
Lampiran 3. Perbandingan Respons Stabilitas <i>Heading (Statis) Setpoint -45</i>	45
Lampiran 4. Perbandingan Respons Stabilitas <i>Heading (Forward) Setpoint 45</i> ...	45
Lampiran 5. Perbandingan Respons Stabilitas <i>Heading (Forward) Setpoint 90</i> ...	46
Lampiran 6. Perbandingan Respons Stabilitas <i>Heading (Forward) Setpoint -45</i> ..	46
Lampiran 7. Perbandingan Respons Manuver <i>Heading Setpoint 0 ke 90</i>	47
Lampiran 8. Perbandingan Respons Manuver <i>Heading Setpoint 0 ke -90</i>	47
Lampiran 9. Perbandingan Respons Gangguan <i>Heading Setpoint 45</i>	48
Lampiran 10. Perbandingan Respons Gangguan <i>Heading Setpoint 90</i>	48

Bab 1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Autonomous Surface Vehicle (ASV) merupakan sistem kapal yang digunakan tanpa adanya campur tangan operator [1]. Kendaraan tanpa awak yang beroperasi secara mandiri berkat sistem kontrol dan navigasi yang terintegrasi. ASV telah banyak diteliti dan diimplementasikan dalam berbagai bidang aplikasi. Contoh-contoh tersebut termasuk pemantauan laut, militer, operasi pencarian dan penyelamatan, survei laut dan pengintaian [2], [3]. Dalam operasinya, stabilitas arah dan respons gerakan merupakan faktor penting bagi ASV untuk mencapai tujuannya dengan efisien dan aman. Oleh karena itu, sistem kendali yang sesuai perlu dirancang untuk memastikan kesuksesan misi.

Ada beberapa metode sistem kendali untuk pergerakan yang telah diusulkan dan diimplementasikan dalam ASV, pendekatan berupa metode kontrol PID (*Proportional – Integral – Derivative*) telah diteliti pada [4][5]. Hasil dari pengujian PID untuk mengendalikan motor servo dan kecepatan motor menunjukkan ASV dapat mencapai posisi target (*setpoint*). Pada prinsipnya, sistem kendali ini dapat ditingkatkan lagi menjadi lebih handal. Dengan sistem ASV yang dinamis dan sifat PID yang menggunakan parameter tetap (*static*), menarik untuk dibahas pada penelitian ini, dan melaporkan bagaimana mendapatkan nilai konstanta K_p , K_i , dan K_d yang adaptif, sehingga dapat menyesuaikan kontrol terhadap perubahan karakteristik secara *realtime*.

Oleh karena itu, pengembangan metode kendali yang dapat mengadaptasi parameter PID secara otomatis menjadi relevan untuk meningkatkan performa sistem dalam lingkungan dinamis. Berbagai penelitian telah mengusulkan penggunaan kontrol berbasis kecerdasan buatan, salah satunya adalah kontrol berbasis *fuzzy logic*. Logika *fuzzy* dinilai lebih tangguh dalam menghadapi sistem-sistem non-linear [6]. Metode kendali *fuzzy* telah diterapkan oleh sejumlah peneliti dalam sistem navigasi yang bergantung pada sensor dan ada penelitian yang menggunakan *fuzzy* untuk penghindaran rintangan pada robot [7], [8]. *Fuzzy logic* sangat bermanfaat untuk membantu robot dalam menentukan tindakan yang seharusnya diambil berdasarkan data sensor yang diterima [9]. Dengan menggabungkan *fuzzy logic* ke dalam sistem kontrol PID, maka parameter *gain* PID dapat disesuaikan secara dinamis terhadap kondisi *error* dan perubahan *error*, menghasilkan sistem kendali yang lebih responsif dan stabil.

Studi ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sistem kendali adaptif berbasis *fuzzy logic* pada platform prototipe ASV. Sistem ini difokuskan pada optimalisasi *motion control* untuk meningkatkan stabilitas dan ketepatan arah gerak ASV, baik saat bergerak lurus maupun saat melakukan manuver belok, sehingga mampu merespons perubahan arah secara cepat dan presisi. Selain memberikan kontribusi dalam bidang ilmiah, pengembangan ini juga bertujuan untuk mendukung capaian prestasi pada kompetisi Kontes Kapal Indonesia (KKI) [10] yang diadakan oleh Direktorat Pembelajaran dan Kemahasiswaan (Belmawa), di mana stabilitas dan gerakan manuver menjadi faktor utama dalam penilaian.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana menerapkan kendali adaptif berbasis *fuzzy logic* pada sistem *motion control Autonomous Surface Vehicle* (ASV)?
2. Seberapa besar kontribusi kendali adaptif berbasis *fuzzy logic* dalam meningkatkan stabilitas arah ASV dalam berbagai kondisi gerak?
3. Bagaimana respon sistem kendali adaptif berbasis *fuzzy logic* dalam menyesuaikan arah hadap ASV terhadap perubahan *setpoint* secara cepat dan stabil selama pergerakan?

1.3. Tujuan

Adapun tujuan spesifik yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Mengimplementasikan kendali adaptif berbasis *fuzzy logic* pada sistem *motion control* ASV, termasuk perancangan himpunan *fuzzy*, aturan inferensi, serta integrasi ke dalam sistem kendali arah dan pergerakan ASV secara *real-time*.
2. Mengevaluasi kontribusi kendali adaptif berbasis *fuzzy logic* terhadap stabilitas arah pergerakan ASV, dengan melakukan pengujian pada skenario, seperti menjaga arah lurus dan mempertahankan *heading* saat ASV berada dalam kondisi diam maupun bergerak.
3. Menganalisis kemampuan sistem dalam menyesuaikan arah hadap ASV terhadap perubahan *setpoint* secara cepat dan stabil, baik saat manuver belok maupun koreksi arah selama pergerakan, sebagai bentuk respon adaptif dari kendali *fuzzy logic* terhadap dinamika sistem.

1.4. Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan banyak keuntungan, baik untuk waktu dekat maupun dalam jangka waktu yang lebih lama, dan untuk kelompok tertentu serta publik secara umum. Beberapa manfaat yang dimaksud meliputi:

1. Untuk akademik, diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dan menjadi referensi dalam pengembangan sistem kendali adaptif berbasis *fuzzy logic* pada *Autonomous Surface Vehicle*(ASV)
2. Untuk penulis, menambah pemahaman teknis yang lebih mendalam terhadap sistem kendali, sensor, serta integrasi perangkat keras dan lunak dalam robotika kelautan.
3. Untuk jangka panjang, mengembangkan solusi teknologi murah, terbuka, dan aplikatif yang dapat digunakan oleh mahasiswa atau peneliti lain dalam mengembangkan ASV secara mandiri.

1.5. Batasan

Agar penelitian lebih terarah, maka ditetapkan beberapa batasan sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya mengkaji sistem pengendalian gerakan yang melibatkan pengaturan arah hadap dan pergerakan ASV. Elemen-elemen seperti navigasi lintasan yang rumit, penghindaran halangan, dan pengaturan posisi tidak dibahas secara rinci.
2. Uji coba dilaksanakan di kolam atau sumber air tertutup, tidak dilakukan di laut lepas atau terbuka, karena mempertimbangkan keamanan, kemudahan pengawasan, dan keterbatasan sumber daya.
3. Sistem tidak menggunakan GPS karena keterbatasan sinyal di lingkungan uji, dan sebagai gantinya menggunakan navigasi lokal untuk estimasi posisi relatif ASV terhadap titik awal.
4. Pengujian dilakukan dalam kondisi buatan yang mensimulasikan gangguan nyata, seperti aliran air buatan untuk meniru pengaruh arus permukaan.

Bab 2. Tinjauan Pustaka

2.1. *Autonomous Surface Vehicle (ASV)*

2.1.1 Definisi ASV

Autonomous Surface Vehicle (ASV) adalah kapal permukaan otonom yang dilengkapi dengan teknologi robotika untuk menjalankan misi tanpa keterlibatan operator manusia secara langsung. ASV mampu membuat keputusan kendali (percepatan, arah, dan navigasi) secara mandiri berdasarkan data dari sensor dan algoritma kontrol terintegrasi [11].

2.1.2 Komponen Utama ASV

Komponen dasar yang umumnya terdapat pada sebuah ASV meliputi:

- *Platform (hull dan structure)*: Biasanya berupa perahu kecil atau *catamaran* ringan yang dirancang untuk stabilitas di permukaan
- Sistem propulsi: Motor listrik, mesin diesel, atau water jet yang memberikan daya dorong dan kontrol arah melalui *thruster* atau rudder.
- Sensor dan kendali: IMU (*Inertial Measurement Unit*), sensor jarak, dan GPS untuk estimasi posisi dan orientasi.
- *Computer on-board (Guidance, Navigation, and Control)*: Menjalankan algoritma kontrol (PID, *fuzzy logic*, atau AI)

2.1.3 Aplikasi dan Kemampuan

ASV telah diterapkan dalam berbagai domain, antara lain:

- Pemantauan dan Penelitian Lingkungan, ASV digunakan untuk melacak hewan laut, melakukan survei batimetri, dan fotogrametri [12].
- Operasi pencarian dan penyelamatan serta pengiriman logistik lepas pantai.
- Pemantauan lingkungan (kualitas air, polusi), serta pengawasan perbatasan dan militer (patroli, pengintaian) [13].

2.1.4 Tantangan

Autonomous Surface Vehicle (ASV) menghadapi tantangan teknis yang signifikan dalam operasinya, terutama dalam sistem *motion control*. Salah satu tantangan adalah mempertahankan kestabilan arah ditengah situasi lingkungan dinamis. Tantangan lain adalah parameter kontrol konvensional yang tidak mampu secara adaptif merespons dengan *real-time*.

2.2 Motion Control Pada Autonomous Surface Vehicle (ASV)

Kendaraan permukaan otonom (ASV) memerlukan sistem kendali yang andal untuk mengatur arah dan gerakannya secara stabil dan responsif. Sistem *motion control* memiliki tanggung jawab terhadap dua hal penting, yaitu menjaga kestabilan arah (*heading/yaw*) dan mengatur pergerakan kapal agar dapat bergerak sesuai kondisi operasional. Dalam berbagai aplikasi, elemen ini menjadi faktor kunci dalam keberhasilan misi ASV, baik dalam situasi yang stabil maupun yang dinamis.

Algoritma yang pada umumnya digunakan untuk mengontrol kestabilan gerakan robot adalah kontrol PID[14]. Metode tuning parameter PID yang paling banyak digunakan, seperti Ziegler–Nichols, diketahui menghasilkan *overshoot* sebesar 10% hingga 60%. Meskipun dengan kesederhanaannya dan efektivitasnya dalam lingkungan yang stabil. Namun, dalam praktiknya, ASV beroperasi di lingkungan yang cenderung berubah-ubah, seperti fluktuasi arus air, angin, dan gangguan sensor. Hal ini menyebabkan respon sistem menjadi tidak linier dan respon kendali menjadi kurang stabil. Kondisi tersebut menimbulkan beberapa tantangan utama, antara lain:

- Ketidakstabilan arah gerak akibat perubahan lingkungan atau delay aktuator.
- Kesalahan *heading* terutama saat melakukan belokan atau koreksi arah, yang menyebabkan penyimpangan dari jalur ideal.
- Kinerja kontrol yang menurun saat terjadi perubahan parameter sistem atau ketidakpastian.

Kondisi-kondisi tersebut menunjukkan bahwa diperlukan pendekatan kendali yang lebih fleksibel dan adaptif untuk memastikan ASV tetap dapat bergerak secara presisi dan stabil, baik saat diam, bergerak lurus, maupun saat melakukan manuver arah.

2.3 Adaptive PID Controller

Adaptive PID Controller secara signifikan meningkatkan kinerja sistem kontrol dibandingkan dengan pengontrol PID konvensional dengan menyesuaikan parameternya secara dinamis dalam menanggapi perubahan kondisi sistem. Pengontrol PID konvensional sering mengalami kesulitan dengan nonlinieritas dan variasi parameter, yang menyebabkan masalah seperti *overshoot* dan waktu respons yang lambat[15]. Dalam pengontrol adaptif, nilai K_p , K_i , dan K_d tidak ditentukan secara tetap, melainkan dihitung atau dituning secara *real-time* menggunakan mekanisme adaptasi tertentu. Pendekatan ini memungkinkan sistem kendali untuk merespons perubahan parameter proses, gangguan eksternal, serta dinamika sistem yang tidak linier secara lebih fleksibel dan akurat.

Penerapan adaptive PID sangat relevan untuk sistem *motion control* pada ASV, ASV senantiasa menghadapi gangguan dari elemen eksternal seperti arus dan gelombang yang perubahan kuantitas dan waktunya tidak selalu teratur. Sistem kontrol PID dengan nilai gain yang tinggi akan efektif untuk mengatasi kesalahan besar, tetapi nilai gain yang tinggi tersebut kurang optimal untuk menangani kesalahan kecil, dan sebaliknya[16].

Salah satu metode yang digunakan untuk melakukan adaptasi parameter PID adalah dengan menggunakan logika *fuzzy*. Dalam penelitian ini, *error* dan *delta error* dijadikan input ke dalam sistem inferensi *fuzzy* untuk menghasilkan nilai K_p , K_i , dan K_d [17]. Dengan demikian, sistem *fuzzy* bertindak sebagai penyesuai adaptif bagi PID, menghasilkan struktur kontrol yang lebih robust terhadap perubahan kondisi operasi. Pendekatan ini dikenal sebagai *Fuzzy-Based Adaptive PID Controller* atau *Fuzzy-PID*, dan telah terbukti meningkatkan kestabilan dan kecepatan respon pada berbagai sistem robotik, termasuk kendaraan permukaan otonom.

2.4. Fuzzy Logic Controller

Logika *fuzzy* menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan metode kontrol tradisional dalam robotika, terutama dalam menangani sistem yang kompleks di mana pemodelan matematis yang tepat menjadi tantangan. Kemampuannya untuk menggabungkan penalaran seperti manusia memungkinkan strategi kontrol yang lebih intuitif, sehingga cocok untuk lingkungan yang dinamis. Namun, *fuzzy* juga memiliki keterbatasan, seperti meningkatnya tuntutan komputasi dan potensi kesulitan dalam menyetel sistem *fuzzy*. Bagian berikut ini menguraikan keunggulan dan keterbatasan utama logika *fuzzy* dalam sistem kontrol robotik.

2.4.1 Keuntungan dan Keterbatasan Fuzzy Logic

Keuntungan:

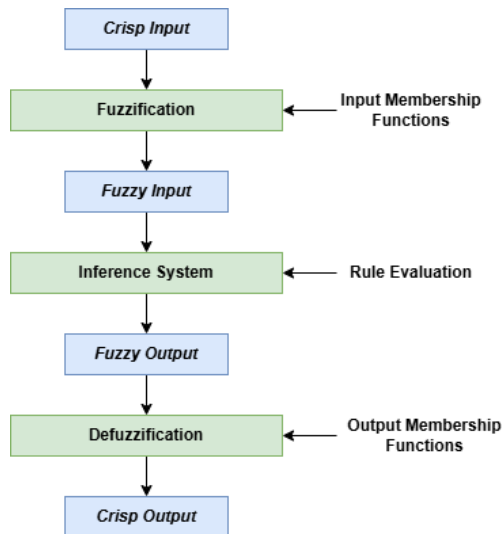
- Ketangguhan terhadap Ketidakpastian: Logika *fuzzy* secara efektif mengelola data yang tidak tepat dan ketidakpastian dalam pembacaan sensor, yang sangat penting untuk robot yang beroperasi di lingkungan yang tidak dapat diprediksi
- Kemudahan Implementasi: Sistem kontrol *fuzzy* dapat dirancang menggunakan aturan linguistik berdasarkan pengetahuan ahli, sehingga tidak memerlukan model matematika yang rumit [18], [19].
- Fleksibilitas: Pengontrol logika *fuzzy* dapat beradaptasi dengan berbagai kondisi, mengungguli pengontrol PID tradisional dalam banyak skenario, terutama dalam sistem *non-linear*.

Keterbatasan:

- Tantangan Penyetelan: Meskipun sistem *fuzzy* lebih mudah diatur, sistem ini bisa jadi sulit untuk disetel untuk mendapatkan kinerja yang optimal, sehingga membutuhkan pengujian dan penyesuaian yang ekstensif
- Kurangnya Landasan Teoritis: Tidak seperti metode kontrol tradisional, logika *fuzzy* tidak memiliki kerangka teori yang kuat, yang dapat mempersulit analisis dan validasi strategi kontrol.

2.4.2 Struktur Fuzzy Logic

Struktur *fuzzy* dapat dilihat dalam flow di bawah :



Gambar 1. Arsitektur Logika Fuzzy

- *Fuzzifikasi*, Proses konversi input-input (masukan) yang bersifat tegas (*crisp*) ke dalam bentuk (*fuzzy*) variabel linguistik menggunakan fungsi keanggotaan.
- *Sistem Inferensi*, Proses pengkonversian input-fuzzy menggunakan aturan-aturan "If-Then" menjadi *Output-Fuzzy*.
- *Defuzzifikasi*, Proses konversi *Output-Fuzzy* dari sistem inferensi ke dalam bentuk tegas (*crisp*) menggunakan fungsi keanggotaan serupa (sebelumnya) menjadi sebuah nilai.

2.4.3 Penelitian Terkait *Fuzzy Logic* untuk *Motion Control* pada ASV

Implementasi kontrol logika fuzzy dalam kontrol gerak untuk kendaraan permukaan otonom (ASV) telah menunjukkan kemajuan yang signifikan dalam hal stabilitas dan kemampuan beradaptasi di berbagai aplikasi. Misalnya, logika fuzzy digunakan untuk menstabilkan *pitch* dan *roll* *Autonomous Submarine Surface Vehicle*, yang secara signifikan mengurangi waktu untuk mencapai kondisi mapan selama manuver [20]. Metode ini menunjukkan waktu stabilisasi yang lebih cepat yaitu 0,518 detik dibandingkan dengan sistem tradisional, yang menunjukkan keefektifannya dalam kondisi dinamis. Ada juga Penelitian yang mengimplementasikan kontrol logika fuzzy pada *Autonomous Surface Vehicle* (ASV) dengan menggunakan fitur kerangka *Kinect* untuk mendapatkan nilai input, yang menghasilkan output kecepatan PWM. Pendekatan ini mencapai tingkat keberhasilan gerakan sebesar 89,9%[21]. Terakhir, terdapat penelitian yang mengimplementasikan kontrol logika fuzzy pada *Unmanned Surface Vehicle* (USV) untuk menavigasi ke arah sumber gas. Sistem ini menyesuaikan kecepatan setiap motor baling-baling berdasarkan konsentrasi gas yang terdeteksi oleh sensor, mencapai akurasi lokalisasi rata-rata 90,1%[22].

2.4.4 Implementasi *Adaptive Fuzzy-PID* dalam *Motion Control* ASV

Sebagai pengembangan dari penerapan *fuzzy logic* dalam kontrol sistem robotik, metode *Adaptive Fuzzy-PID* merupakan pendekatan yang paling umum digunakan untuk meningkatkan fleksibilitas dan respons sistem dalam menghadapi dinamika *non-linier*. Pengontrol *Fuzzy-PID* merupakan pengendali adaptif yang menggabungkan mekanisme PID konvensional dengan logika fuzzy untuk menangani sistem kendali *nonlinier*. Pada dasarnya, keluaran logika fuzzy (*Fuzzy Inference System*) digunakan untuk menyesuaikan parameter-parameter PID (*Proportional – Integral – Derivative*) secara real-time berdasarkan besarnya kesalahan (error) dan perubahan error. Pengontrol PID tradisional sering berjuang dengan nonlinieritas dan gangguan eksternal, yang mengarah ke kinerja kurang optimal. Sebaliknya, pengontrol *Fuzzy-PID Adaptive* menggunakan logika fuzzy untuk menyesuaikan parameter kontrol secara dinamis, sehingga meningkatkan respons terhadap perubahan kondisi dan mengurangi *overshoot* hingga 86% [23]. Dengan mengubah penguatan PID melalui aturan fuzzy, pengontrol ini dapat menangani ketidaklinieran dinamis dengan lebih baik dibanding PID biasa.

Al-Odienat dan Al-Lawama (2008) menjelaskan bahwa pengendali berbasis logika fuzzy memiliki rentang kondisi operasi yang lebih luas dan sifat *robust* (tangguh) yang lebih baik, serta dapat diatur dengan rule bahasa alami yang intuitif [24]. Hal ini memungkinkan *Fuzzy-PID* bekerja pada beragam kondisi operasi ASV yang tidak linier dengan tingkat sensitivitas gangguan yang lebih rendah. Secara keseluruhan, kemajuan ini menggarisbawahi potensi kontrol *Fuzzy-PID Adaptive* dalam meningkatkan kemampuan operasional ASV.

Tabel 1. Penelitian Terkait

No	Tahun	Penulis	Jurnal	Judul	Metode	Kelemahan
1	2023	Abdul Hafizh Aryan Faruq, Joko Endrasmono, Isa Rachman, Agus Khumaidi, Ryan Yudha Adhitya, Zindhu Maulana Ahmad Putra	infotek mesin	Kontrol Kestabilan Kapal Autonomous Submarine Surface Vehicle Dengan Metode Fuzzy Logic	Fuzzy Logic Controller	Tidak fokus pada kestabilan <i>yaw/heading</i> dan pergerakan
2	2024	Jinyu Han	Journal of Engineering Research and Reports	Design and Application of Fuzzy PID Controller Based on MATLAB	Fuzzy-PID Controller	Tidak diimplementasikan langsung terutama pada ASV
3	2019	Radimas Putra M.D.L, Muhammad Rivai, Astria Nur Irfansyah	Journal of Physics: Conference Series	Unmanned Surface Vehicle Navigation Based on Gas Sensors and Fuzzy Logic Control to Localize Gas Source	Fuzzy Logic Controller, menggunakan perbedaan pembacaan dua sensor gas (MQ-4) untuk menyesuaikan PWM	Pengaturan PWM hanya ditujukan untuk lokalisasi gas, tidak mengoptimasi kestabilan <i>yaw</i> saat diam atau gerak

					motor kanan/kiri secara real-time	
4	2018	Husnawati	Jurnal Ilmiah Informatika Global	Penerapan Metode Fuzzy Sugeno Sebagai Sistem Navigasi Robot Menggunakan Mikrokontroler Arduino dan Sensor Ultrasonik	Fuzzy Logic tipe Sugeno, Rule If-Then untuk penghindaran rintangan	Tidak ada metrik stabilitas/akurasi arah dan gerak (hanya penghindaran rintangan), tidak diterapkan pada ASV, Rule base tetap tanpa adaptasi parameter fuzzy
5	2015	Sarmayanta Sembiring, Rossi Passarella, Hendra Setiawan, Yandi Prasetya	Annual Research Seminar	Implementasi Metode Fuzzy Sugeno pada Robot Kapal Penghindar Rintangan	Fuzzy Sugeno untuk duty-cycle PWM thruster, sensor ultrasonik multi-sisi mengukur jarak rintangan real-time	Hanya fokus avoidance, tanpa optimasi parameter untuk stabilitas yaw atau perubahan setpoint
6	2024	Ahmad Syafiq I'tishom, Agus Wiyono, Muhammad Syariffuddien	Jurnal Teknik Elektro	Pemodelan Sistem Kontrol Stabilizer PWM Motor	Kontrol PID untuk stabilisasi thruster dan	Tuning PID trial-and-error tanpa adaptasi parameter, kurang robust

		Zuhrie, Lusia Rakhmawati		Thruster Menggunakan Electric Speed Controller pada Prototipe Autonomous Tourism Surface Vessel Berbasis PID	<i>heading</i> , mengonversi keluaran PID ke sinyal PWM melalui ESC.	terhadap perubahan beban
7	2020	Alif Ihza Ahmada, Wahyudi dan Eko Handoyo	Transien t	Implementasi Pengendali Pid Untuk Navigasi Autonomous Berbasis Global Positioning System Pada Purwarupa Autonomous Surface Vehicle	Kontrol PID untuk menggerakkan rudder mengikuti waypoint GPS.	Bergantung penuh dengan GPS tanpa adaptasi parameter, akurasi gerak dan waktu stabilisasi masih relatif lama
8	2023	Kartika Sekarsari, Ahmad Nuryadi, Syaiful Rizal	Journal of Electrical Power, Instrument and Control	Pengendali Fuzzy Logic untuk Manuver Robot Bawah Air	Fuzzy Logic tipe Sugeno	Tidak mengevaluasi kestabilan yaw secara kontinyu, hanya menguji manuver pada rentang pendek (10-80cm)

9	2023	Joko Subur, Suryadhi, Eki Arohman	Prosiding Seminar Nasional Teknik (SENATE K) 2023	Penerapan Metode Fuzzy Logic-PID Sebagai Kontrol Gerak Robot Berkaki Enam (Hexapod)	Fuzzy-PID	Tidak membahas stabilan yaw, hanya kontrol gerak maju saja
10	2020	Ahmad Zarkasi, Ilham Junius Angkotasan, Muhammad Al Ravi, Endang Darmawan Yudi	Advances in Intelligent Systems Research, SICONIA N 2019	Design <i>Heading</i> Control for Steering AUV with fuzzy logic	Takagi- Sugeno Fuzzy Inference System	Fokus hanya pada kontrol yaw, tanpa optimasi gerakan maju
11	2019	Khafidurrohm an Agustianto & Dyah Ayu Dwijayanti	Jurnal Teknologi Informasi dan Terapan	Autonomous Surface Vehicle Controlling Menggunakan Kinect untuk Observasi Terumbu Karang	Fuzzy Sugeno diterapkan untuk mengend alikan kecepatan dua motor ASV berdasarkan sudut tangan pengguna yang dilacak oleh	Kontrol arah dan kecepatan hanya berdasarkan input eksternal(gesture) , tanpa umpan balik dari sensor. Tidak ada evaluasi kestabilan <i>heading</i> atau akurasi saat perubahan gerak ke setpoint.

					Kinect. Rule fuzzy mengatur PWM motor kanan dan kiri berdasark an kombinasi sudut kiri dan kanan.	
--	--	--	--	--	---	--

Berdasarkan kerangka teori yang telah diuraikan, dapat disimpulkan bahwa meskipun berbagai studi telah berhasil menerapkan kontrol berbasis logika *fuzzy* pada platform robotika termasuk ASV, masih terdapat kekosongan penelitian yang dapat dieksplorasi lebih lanjut. Salah satu kekurangan yang menonjol adalah terbatasnya optimasi sistem kontrol pergerakan menggunakan metode *Fuzzy-PID* pada prototipe ASV, khususnya yang beroperasi dengan sumber daya komputasi yang rendah. Beberapa penelitian yang dilakukan Abdul et al. (2023), Radimas Putra et al. (2019) dan Sarmayanta et al. (2015), belum secara spesifik membahas aspek kestabilan *heading*. Sementara itu, penelitian Ahmad Zarkasi et al. (2020) pada AUV tidak menyoroti aspek optimasi kendali gerak maju. Disisi lain, penelitian Khafidurrohman et al. (2019) mengandalkan kontrol arah dan kecepatan hanya berdasarkan input eksternal(gesture), tanpa umpan balik dari sensor. Tidak hanya mempertimbangkan dinamika pergerakan ASV secara komprehensif, tetapi juga dapat diimplementasikan pada platform dengan keterbatasan perangkat keras.

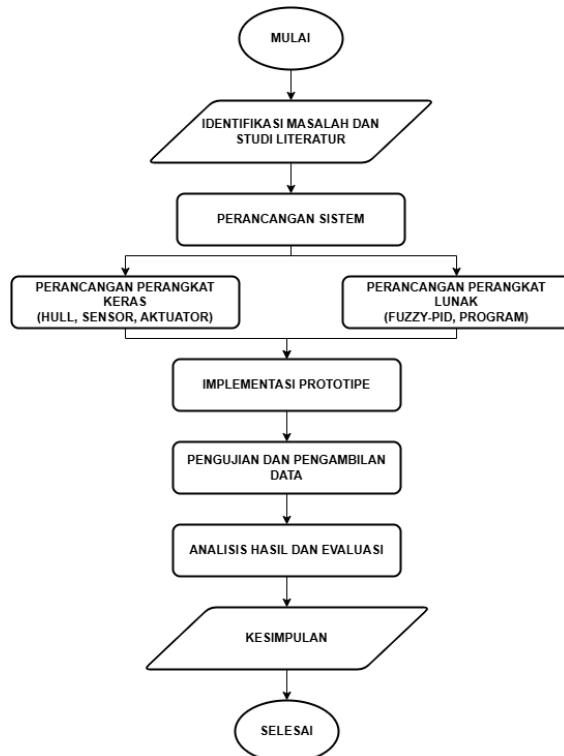
Oleh karena itu, tugas akhir ini diarahkan untuk mengembangkan dan menguji sistem kontrol pergerakan berbasis *Fuzzy-PID* yang dioptimalkan dengan memanfaatkan sensor IMU sebagai masukan utama dalam kendali arah (*heading*). Fokus utama penelitian adalah meningkatkan stabilitas arah saat diam maupun saat bergerak, serta memastikan sistem dapat merespons perubahan *setpoint* arah secara cepat dan akurat. Sistem dirancang agar mampu beroperasi secara efisien pada platform terbatas berbasis mikrokontroler.

Bab 3. Metodologi Penelitian

3.1. Perancangan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan kendali adaptif berbasis *fuzzy logic* untuk peningkatan stabilitas arah dan pergerakan *autonomous surface vehicle*. Tahapan penelitian mencakup perancangan perangkat keras, perangkat lunak, serta pengujian performansi sistem dalam berbagai skenario uji. Sistem akan mengandalkan input dari sensor IMU untuk estimasi arah dan output aktuator *thruster* untuk pendorong gerakan, yang mana diproses oleh pengontrol *Fuzzy-PID* untuk menghasilkan kendali gerakan yang stabil dan akurat.

Secara umum, proses perancangan penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan utama, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. :



Gambar 2. Tahapan Penelitian

3.1.1 Perancangan Perangkat Keras (*Hardware*)



Gambar 3. Front View ASV

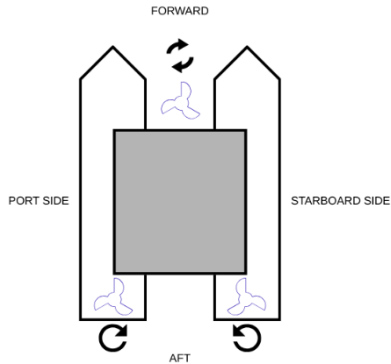


Gambar 4. Back View ASV



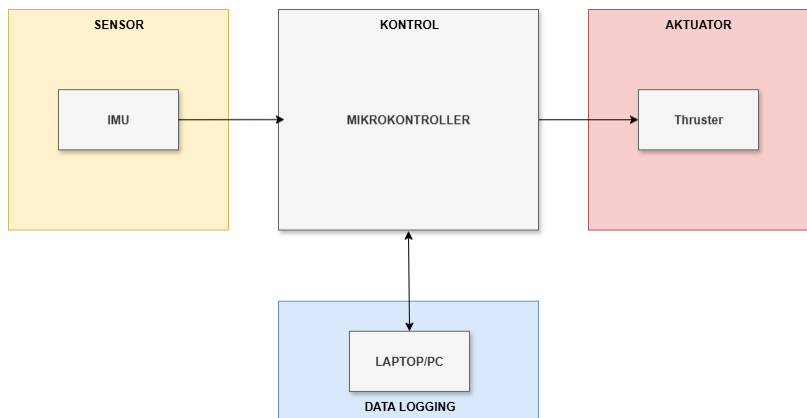
Gambar 5. Side View ASV

Gambar 3.4.5 adalah rancangan desain mekanikal dari *autonomous surface vehicle* yang akan digunakan pada penelitian ini. Dengan menggunakan tipe lambung *catamaran* dengan masing masing *thruster* dibelakangnya, dan 1 *thruster* depan dengan sistem *bow* untuk membantu rotasi *heading* pada ASV.



Gambar 6. Konfigurasi Thruster dan Hull

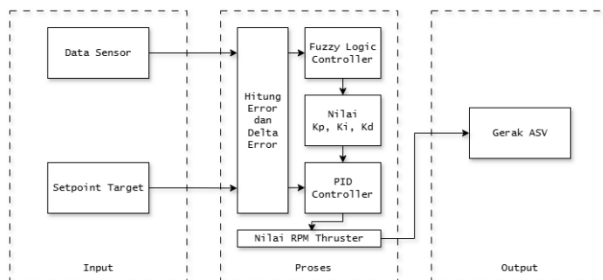
Menurut desain mekanis struktur kendaraan permukaan otonom (ASV), langkah selanjutnya adalah merancang sistem elektrikal yang mengintegrasikan sensor, mikrokontroler dan aktuator sebagai bagian dari sistem kontrol gerakan. Tujuan dari rancangan ini adalah untuk menghubungkan semua komponen dan memastikan bahwa mereka didukung dan disinkronkan dengan algoritma kendali adaptif berbasis *PID fuzzy* untuk kontrol gerak. Gambar 6. menunjukkan blok diagram sistem elektrikal untuk ASV yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 7. Blok Diagram Elektrikal

3.1.2 Perancangan Perangkat Lunak (Software)

Sistem perangkat lunak dalam penelitian ini dirancang untuk mengendalikan gerak dan arah ASV secara adaptif berdasarkan data *real-time* dari sensor. Algoritma kontrol utama menggunakan pendekatan *Fuzzy-PID*, di mana logika *fuzzy* berfungsi menyetel parameter PID secara dinamis berdasarkan besarnya *error* dan perubahan *error* ($\Delta error$). Seluruh proses ini dijalankan secara terintegrasi di mikrokontroler dengan pembacaan data sensor dan pemberian sinyal PWM ke aktuator kapal ASV sebagaimana pada Gambar 8.



Gambar 8. Blok Diagram Sistem

Dalam sistem kontrol ini, nilai *error* dan *delta error* ($\Delta error$) dihitung secara *real-time* untuk menjadi masukan (input) ke dalam sistem inferensi *fuzzy*. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$error(t) = setpoint - nilai\ aktual(t) \quad (1)$$

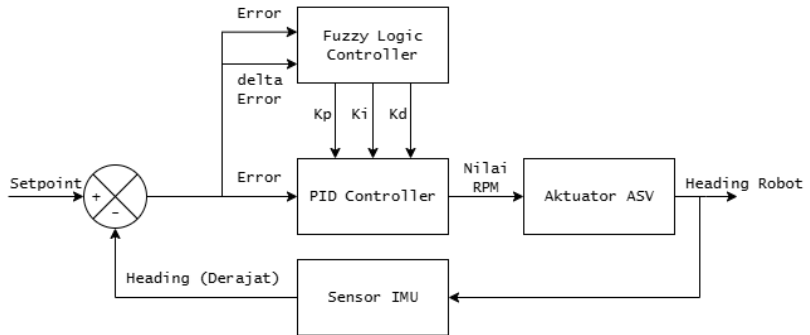
$$\Delta error(t) = \frac{error(t) - error(t - 1)}{\Delta t} \quad (2)$$

Keterangan	:	
$error(t)$	:	Selisih antara nilai setpoint dengan nilai aktual sensor pada waktu ke- t
$nilai\ aktual(t)$	:	Pembacaan sensor pada waktu ke- t
$\Delta error(t)$	:	Perubahan <i>error</i> antara waktu sekarang dan waktu sebelumnya

Kedua nilai ini menjadi input pada proses *fuzzifikasi*, yang kemudian diolah menggunakan aturan inferensi *fuzzy* untuk menghasilkan nilai K_p , K_i , dan K_d secara dinamis. Nilai konstanta PID tersebut kemudian digunakan untuk menghitung sinyal kontrol akhir ke aktuator ASV.

3.1.3 Perancangan sistem kontrol *Fuzzy-PID*

Selanjutnya terdapat alur sistem yang disajikan dalam bentuk blok diagram dari *fuzzy-PID* yang akan diimplementasikan pada ASV. Pada gambar 8. Menunjukkan penggabungan metode *Fuzzy logic Controller* dan *PID Controller* yang digunakan untuk mengatur arah dan pergerakan ASV secara adaptif. Sistem ini menggunakan data *heading* (derajat) yang diperoleh dari sensor IMU sebagai masukan kendali.



Gambar 9. Blok Diagram Sistem Metode *Fuzzy-PID*

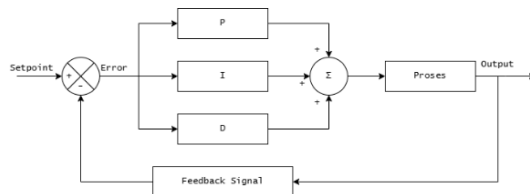
Sistem *fuzzy* yang digunakan dalam pengendalian ini terdiri dari tiga tahap utama, yaitu *fuzzifikasi*, inferensi berbasis aturan (*rule base*), dan *defuzzifikasi*. Nilai *error* dan $\Delta error$ yang dihitung dari selisih antara *heading* setpoint dan pembacaan sensor IMU *difuzzifikasi* ke dalam bentuk nilai linguistik menggunakan fungsi keanggotaan segitiga. Setiap pasangan nilai *error* dan $\Delta error$ kemudian diolah dalam tabel *rule base* untuk menghasilkan output berupa nilai *Kp*, *Ki*, dan *Kd* yang bersifat adaptif. Proses *defuzzifikasi* dilakukan dengan metode *Center of Gravity* (COG) untuk memperoleh nilai *crisp* yang akan digunakan oleh PID Controller sebagai masukan pengendali aktual.

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(z_i) z_i}{\sum_{i=1}^n \mu(z_i)} \quad (3)$$

Keterangan	:	
z^*	:	Nilai output hasil <i>defuzzifikasi</i>
$\mu(z_i)$	:	Derajat keanggotaan <i>fuzzy</i> untuk nilai z_i
z_i	:	Nilai dari variable output(<i>Kp, Ki, Kd</i>)
n	:	Jumlah titik pada domain output

3.1.4 Perancangan sistem kontrol PID

Pengaturan PID memiliki fungsi krusial dalam sistem pengendalian dengan memanfaatkan kesalahan yang ada pada setiap parameter PID. Dalam bagian kontrol proporsional, ini memodifikasi besarnya *overshoot* untuk mencapai target yang sudah ditetapkan. Sedangkan untuk kontrol derivatif, fungsinya adalah untuk mengurangi atau menahan kenaikan dari perubahan proporsional ketika mendekati target di masa depan. Kontrol integral, di sisi yang berbeda, memiliki tujuan untuk menyesuaikan penurunan atau kenaikan sesuai dengan arah yang diinginkan sehingga ketika nilai telah beradaptasi dengan kondisi stabil, sistem akan berupaya untuk menjaga kestabilan tersebut berdasarkan pengukuran yang sebelumnya atau kesalahan yang sudah terjadi.



Gambar 10. Blok Diagram Sistem PID

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Keterangan	:	
$u(t)$	:	Output kendali (Nilai PWM ke motor)
$e(t)$	:	Error = setpoint – output aktual
K_p	:	Konstanta penguatan proporsional
K_i	:	Konstanta penguatan integral
K_d	:	Konstanta penguatan derivative
τ	:	Variabel integrasi, nilainya diambil dari waktu nol sampai t
t	:	Waktu

Perhitungan PID kemudian diimplementasikan ke dalam mikrokontroler dengan menggunakan rumus kontrol PID klasik. Dalam pendekatan ini, nilai konstanta K_p , K_i , dan K_d tidak ditetapkan secara tetap, melainkan disesuaikan secara adaptif berdasarkan hasil keluaran dari sistem logika *fuzzy*. Nilai-nilai konstanta tersebut akan berubah sesuai kondisi sistem, mengikuti aturan (*rule base*) yang telah dirancang pada pengendali *fuzzy*, sehingga menghasilkan respons kendali yang lebih fleksibel dan *robust* terhadap perubahan dinamika pergerakan ASV.

3.2 Alat dan Bahan

Beberapa bagian perangkat keras dan perangkat lunak yang diperlukan untuk mendukung proses perancangan dan penerapan sistem kontrol pada kendaraan permukaan otonom (ASV) termasuk sensor, aktuator, mikrokontroler, dan peralatan tambahan yang digunakan dalam proses pengujian dan analisis sistem. Tabel berikut menunjukkan rincian alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini:

Tabel 2. Estimasi Biaya

No.	Alat/bahan	Harga Satuan (Rp.)	Jumlah	Total (Rp.)	Keterangan
1	Laptop	Rp-	1	Rp-	Pribadi
2	Aluminium Profile	Rp50.000	5m	Rp250.000	Polibatam
3	Motor Servo	Rp150.000	2	Rp300.000	Polibatam
4	Hull Structure	Rp-	2	Rp-	Polibatam
5	Kabel AWG	Rp6.000	10m	Rp60.000	Polibatam
6	OLED	Rp50.000	1	Rp50.000	Polibatam
7	IMU	Rp260.000	1	Rp260.000	Polibatam
8	ESC	Rp600.000	3	Rp1.800.000	Polibatam
9	Thruster T200	Rp3.500.000	3	Rp10.500.000	Polibatam
10	ESP32/STM32	Rp60.000	1	Rp60.000	Polibatam
11	Kotak Elektrikal	Rp-	1	Rp-	Polibatam
12	Emergency BTN	Rp15.000	1	Rp15.000	Polibatam
13	Terminal Blok	Rp2.000	1	Rp2.000	Polibatam
14	Battery LiPO16V	Rp1.200.000	3	Rp3.600.000	Polibatam
15	Konektor Kabel	Rp4.000	6	Rp24.000	Polibatam
16	Remot Kontrol	Rp700.000	1	Rp700.000	Polibatam
17	Step Down	Rp32.000	1	Rp32.000	Polibatam
18	Switch on/off	Rp6.000	1	Rp6.000	Polibatam
Total				Rp17.659.000	

Alat dan bahan ini dipilih dengan mempertimbangkan kompatibilitas, ketersediaan, dan efektivitas dalam mendukung penelitian, serta merupakan penerapan akhir dari algoritma kontrol *PID fuzzy* dalam sistem ASV. Langkah berikutnya adalah melakukan pengujian sistem berdasarkan algoritma kontrol yang telah dibuat untuk mengevaluasi kinerja kendali arah dan pergerakan ASV.

3.3. Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem kendali berbasis *Fuzzy Logic* dalam mengatur arah hadap (*heading*) dan pergerakan *Autonomous Surface Vehicle* (ASV) secara *real-time*. Pengujian difokuskan pada tiga aspek utama, yaitu implementasi sistem kendali *fuzzy-PID*, stabilitas arah saat ASV dalam kondisi diam dan gerak, serta respons dan kecepatan sistem dalam menyesuaikan arah ketika ASV bergerak maju atau melakukan manuver belok. Jenis pengujian yang dilakukan disusun untuk menjawab ketiga tujuan penelitian.

3.3.1 Pengujian Implementasi Sistem Kendali *Fuzzy Logic*

Pengujian awal dilakukan untuk memastikan bahwa sistem kendali adaptif berbasis *Fuzzy Logic* yang diintegrasikan dalam algoritma *Fuzzy-PID* telah berjalan sebagaimana mestinya pada mikrokontroler. Proses ini meliputi verifikasi bahwa pembacaan data dari sensor IMU dapat dilakukan secara *real-time* dan digunakan sebagai input untuk menghitung nilai *error* serta perubahan *error* ($\Delta error$).

Nilai-nilai tersebut kemudian diproses melalui sistem inferensi *fuzzy* yang terdiri dari tahap *fuzzifikasi*, *rule base*, dan *defuzzifikasi*. Output dari sistem *fuzzy* berupa nilai K_p , K_i , dan K_d harus ter-update secara dinamis mengikuti perubahan kondisi *error*. Pengujian dilakukan dengan memantau output *fuzzy* secara langsung melalui serial monitor dan mencocokkannya dengan kondisi input.

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk membuktikan bahwa integrasi *fuzzy logic* ke dalam sistem *motion control* ASV telah berjalan dengan benar dan responsif. Apabila sistem berfungsi sesuai dengan rancangan, maka nilai parameter PID akan beradaptasi secara otomatis sesuai dengan logika aturan *fuzzy* yang telah ditentukan.

Tabel 3. Hasil *fuzzy* untuk mendapatkan K_p , K_i , K_d

No	Data Input			Hasil Fuzzy		
	Index e/ed	Error	DeltaError	K_p	K_i	K_d
1						
2						
3						
4						
5						

3.3.2 Pengujian Stabilitas Arah Hadap ASV

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem kendali dalam menjaga atau mengubah arah hadap (*heading*) ASV secara presisi saat posisi kapal dalam keadaan diam (statis) dan bergerak lurus. Skenario dilakukan dengan memberikan perintah perubahan *setpoint heading* tertentu (misalnya dari 0° ke 45° atau 90°), kemudian diamati respons sistem hingga *heading* mencapai target dan stabil.

Pengujian dilakukan sebanyak 3–5 kali untuk setiap skenario *setpoint* dan hasilnya akan dirata-ratakan. Data yang diukur meliputi respons sistem dari waktu awal perubahan *heading* hingga sistem berada pada kondisi stabil. Dengan parameter performa yang dievaluasi meliputi overshoot, settling time, dan steady state error.

Overshoot(%) yaitu besarnya deviasi maksimum di atas *setpoint* sebelum sistem kembali stabil.

$$\text{Overshoot\%} = \frac{H_{\max} - H_{\text{setpoint}}}{H_{\text{setpoint}}} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan	:	
$H_{\max}$	:	<i>Heading</i> maksimum yang tercapai
H_{setpoint}	:	<i>Heading</i> tujuan

Settling time(s) yaitu waktu yang dibutuhkan dari awal perubahan *setpoint* hingga sistem mencapai nilai toleransi dari *setpoint*.

$$T_s = T_{\text{stabil}} - T_{\text{setpoint_change}} \quad (6)$$

Keterangan	:	
t_{stabil}	:	Waktu saat <i>heading</i> bertahan dalam toleransi <i>setpoint</i>
$t_{\text{setpoint_change}}$	:	Waktu ketika <i>setpoint</i> berubah

Steady state error(%) yaitu selisih antara *setpoint* dengan nilai keluaran dari suatu sistem setelah keluaran tersebut stabil.

$$\text{Ess\%} = \frac{\text{Ess}}{\text{Setpoint}} \times 100\% \quad (7)$$

Keterangan	:	
<i>setpoint</i>	:	<i>Heading</i> tujuan
<i>Ess</i>	:	Rata-rata nilai akhir keluaran

Dengan kriteria keberhasilan pengujian ditetapkan sebagai berikut:

1. *Overshoot* $\leq 10\%$
2. *Settling Time* $\leq 5 \text{ sec}$
3. *Steady state error* $\leq 5\%$

Tabel 4. Hasil Pengujian Stabilitas Heading (Statis)

Hasil Pengujian Stabilitas Heading (Statis)							
Trial	Setpoint (°)	Parameter					
		PID			Fuzzy-PID		
		Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)	Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)
1	45						
2							
3							
Rata-rata							
1	90						
2							
3							
Rata-rata							
1	-45						
2							
3							
Rata-rata							

Tabel 5. Hasil Pengujian Stabilitas Heading (Forward)

Hasil Pengujian Stabilitas Heading (Forward)							
Trial	Setpoint (°)	Parameter					
		PID			Fuzzy-PID		
		Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)	Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)
1	45						
2							
3							
Rata-rata							
1	90						
2							
3							
Rata-rata							
1	-45						
2							
3							
Rata-rata							

3.3.3 Pengujian Respons Pergerakan Arah ASV

Pada skenario ini, ASV dijalankan untuk bergerak maju dengan diberikan perintah *heading* untuk berbagai skenario uji seperti bergerak lurus dan melakukan belokan, atau koreksi arah. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana sistem kendali mempertahankan *heading* saat bergerak, serta seberapa cepat dan adaptif merespons perubahan setpoint arah.

Untuk setiap skenario, pengujian dilakukan sebanyak 3–5 kali untuk mendapatkan hasil yang akurat. Selama pengujian, nilai *heading* dari IMU dicatat dan dibandingkan dengan setpoint. Parameter yang diamati *overshoot*, *settling time* dan *steady state error*. Melalui pengujian ini, sistem kontrol *Fuzzy-PID* diharapkan mampu menunjukkan keunggulannya dalam menjaga kestabilan arah secara adaptif saat melakukan perubahan arah selama pergerakan berlangsung.

Tabel 6. Hasil Pengujian Respons Heading (Manuver Heading)

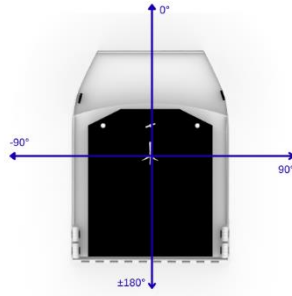
Hasil Pengujian Respons <i>Heading</i> (Manuver <i>Heading</i>)							
Trial	Setpoint (°)	Parameter					
		PID			Fuzzy-PID		
		Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)	Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)
1	0 ke 90						
2							
3							
Rata-rata							
1	0 ke -90						
2							
3							
Rata-rata							

Tabel 7. Hasil Pengujian Respons Heading (Gangguan Heading)

Hasil Pengujian Respons Heading (Gangguan Heading)							
Trial	Setpoint (°)	Parameter					
		PID			Fuzzy-PID		
		Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)	Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)
1	45						
2							
3							
Rata-rata							
1	90						
2							
3							
Rata-rata							

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Pengujian Sudut Sensor IMU



Gambar 11. Orientasi Yaw

Pengujian IMU BNO055 dilakukan untuk menentukan arah *yaw* dari ASV. Dengan menggunakan sudut yaw dalam format ± 180 (*Bidirectional Heading*) Data tersebut akan dijadikan input utama dari sistem kontrol pada penelitian ini.



Gambar 12. Pengujian Sudut Heading ASV

Dari Gambar, dapat dilihat bahwa pengujian dilakukan dengan memutar ASV pada sudut tertentu. Nilai keluaran sensor IMU BNO055 akan diamati dan dicatat. Uji ini dilakukan di darat menggunakan kursi putar tanpa sandaran sebagai alat bantu.

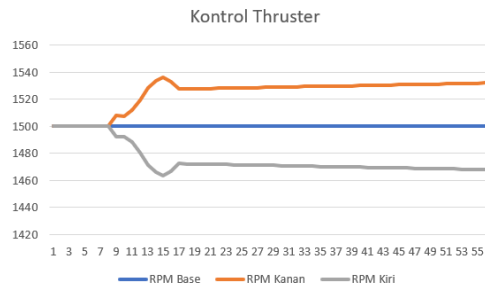
Tabel 8. Pengujian Sudut IMU

Derajat	Pengujian					Rata-Rata	Selisih
	1	2	3	4	5		
0	0,00	-0,06	0,00	-0,06	0,00	-0,02	-0,02
45	44,31	44,19	45,63	44,81	45,25	44,84	0,16
90	89,81	88,87	89,44	90,31	90,06	89,70	0,30
135	134,38	135,13	135,94	135,00	135,56	135,20	0,20
180	-179,44	-178,38	-179,50	-179,56	-179,69	-179,31	-0,69
-135	-135,33	-135,25	-134,00	-135,56	-134,69	-134,97	-0,03
-90	-90,81	-91,75	89,31	-90,19	-89,69	-90,35	-0,35
-45	-44,13	-45,63	-45,63	-44,63	-44,44	-44,89	-0,11

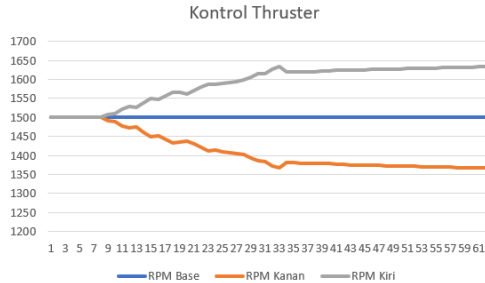
Dalam uji yaw pada IMU BNO055 seperti tercantum dalam Tabel 8, ASV diputar pada sudut 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, -135°, -90°, dan -45°. Data pengujian menunjukkan selisih sudut yang diukur dari 0,30 hingga -0,69, nilai selisih sudut sensor berada pada rentang yang cukup kecil dari sudut aktual.

4.2 Pengujian Respons Motor *Thruster*

Berdasarkan rancangan mekanikal dari Autonomous Surface Vehicle yang digunakan pada penelitian ini. Mekanisme *differential thrust* untuk mempertahankan orientasi (*heading*) dan melakukan manuver. Mekanisme ini bekerja dengan mengatur perbedaan kecepatan putar (RPM) antara *thruster* kiri dan kanan berdasarkan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dihasilkan oleh sistem kendali.



Gambar 13. Respons Sinyal *Thruster* Koreksi Positif



Gambar 14. Respons Sinyal Thruster Koreksi Negatif

Dari **Gambar 13** dan **Gambar 14** memperlihatkan respons sistem terhadap gangguan orientasi. Prinsip kerja sistem memberikan gaya dorong yang berlawanan arah, apabila heading menyimpang ke arah positif maka perlu koreksi ke kiri dengan meningkatkan kecepatan *thruster* kanan dan menurunkan kecepatan *thruster* kiri secara proposional, begitupun sebaliknya.

Secara keseluruhan, data pengujian ini memvalidasi bahwa algoritma pembagian tugas pada aktuator telah berfungsi sesuai perancangan. Sistem mampu memecah keluaran kontrol menjadi dua sinyal motor yang berbeda (*differential*) untuk menjamin stabilitas *heading* selama operasi.

4.3 Penalaan Parameter PID

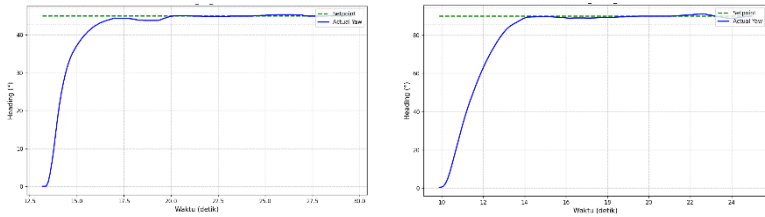
Kestabilan dan respons sistem *Autonomous Surface Vehicle* bergantung pada proses penalaan (tuning) parameter kontroler PID. Tahap awal penalaan parameter dilakukan perancangan sistem kendali menggunakan teknik Ziegler-Nichols tipe osilasi tertutup. Diawali dengan menonaktifkan parameter integral ($K_i = 0$) dan derivatif ($K_d = 0$). Kemudian, secara beransur-ansur, nilai proporsional (K_p) meningkat sehingga ia mencapai Ultimate Gain (K_u), di mana sistem mencapai kondisi osilasi yang berkelanjutan dan stabil.

Hasil pengujian lapangan, bagaimanapun, menunjukkan bahwa metode ini tidak dapat diterapkan pada ASV yang telah dikembangkan. Karena sistem menunjukkan ciri overdamped yang dominan. Meskipun nilai K_p meningkat secara signifikan hingga mencapai ratusan, sistem tidak menunjukkan gejala osilasi yang diperlukan oleh metode Ziegler-Nichols. Metode ini dihentikan untuk menghindari kerusakan hardware, terutama driver motor, thruster, dan sensor, karena lonjakan arus yang berlebihan (*spike current*) saat pemaksaan nilai K_p tinggi.

Metode *Fine Tuning*, atau penalaan manual, digunakan sebagai pengganti metode Ziegler-Nichols. Metode ini berpusat pada analisis terstruktur dari respon transien sistem. Proses penalaan dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Penentuan K_p (Respon Transien): Nilai K_p dinaikkan secara bertahap untuk meminimalkan *Rise Time*, sehingga sistem memiliki respon yang cepat saat mengejar *setpoint* sudut hadap (*heading*).
2. Penambahan K_d (Peredaman): Untuk memberikan efek pengereman atau damping saat sistem mendekati *setpoint*, parameter derivatif K_d ditambahkan setelah respons cepat diperoleh. Tujuannya adalah untuk mengurangi atau menghilangkan *overshoot* yang disebabkan oleh momentum inersia kapal.
3. Koreksi K_i (Eliminasi Error): Terakhir, Untuk menghilangkan kesalahan keadaan tunak, atau eror keadaan tunak, yang tersisa, parameter integral K_i diberi nilai kecil.

Berdasarkan serangkaian uji coba *Trial and Error*, didapatkan beberapa set parameter PID.



Gambar 15. Respon Sistem Heading ASV

Dari hasil eksperimen, pada **Gambar 15** menunjukkan gelombang output pada kondisi bergerak *forward* dan *statis* dalam kondisi stabil serta merespons dengan cepat, sehingga ditetapkan parameter final yang dipilih untuk mode *forward* adalah $K_p = 24.0$, $K_i = 0.65$, $K_d = 8.0$. Sedangkan untuk mode *statis* yang memerlukan respon lebih agresif, dipilih parameter $K_p = 45.0$, $K_i = 1.0$, $K_d = 40.0$. Parameter ini yang akan digunakan sebagai parameter PID dasar(*base parameter*) dalam pengendali Fuzzy-PID.

4.4 Menetapkan Aturan Pengendalian Fuzzy

Sistem kendali harus mampu melakukan koreksi dan penyesuaian secara real-time terhadap tiga parameter proporsional, integral, dan derivatif dari PID berdasarkan prinsip-prinsip berikut:

$$K_p = K_{p0} + (G_u \Delta K_p) \quad (8)$$

$$K_i = K_{i0} + (G_u \Delta K_i) \quad (9)$$

$$K_d = K_{d0} + (G_u \Delta K_d) \quad (10)$$

Dalam persamaan (8), (9), dan (10), $Kp0$, $Ki0$, dan $Kd0$ adalah parameter PID dasar(*base parameters*) yang ditentukan dari hasil penalaan awal. ΔKp , ΔKi , dan ΔKd adalah nilai koreksi yang dihasilkan oleh defuzzifikasi sistem inferensi fuzzy. Gu (*Gain Update*) adalah konstanta pengali yang berfungsi untuk mengatur sensitivitas atau besarnya pengaruh koreksi fuzzy terhadap parameter dasar. Kp , Ki , dan Kd adalah nilai keluaran akhir setelah pengendali Fuzzy PID.

Penentuan *rule base* berdasarkan aksi dari masukan error dan delta error dengan keluaran dari variable Kp , Ki dan Kd . Pada sistematis penentuan *rule base* juga sesuai dengan fungsi tiap konstanta PID yang mempunyai fungsi berbeda-beda sehingga *rule base* pada konstanta harus disesuaikan dengan fungsi yang terkait kontrol PID.

Tabel 9. Perencanaan Penyesuaian Kendali Fuzzy Kp

e\de	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PS	PS	Z	PS	PS	PM
PS	PS	PS	Z	PS	PM	PM	PM
PM	NS	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

Tabel 10. Perencanaan Penyesuaian Kendali Fuzzy Ki

e\de	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NM	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NM	NM	NS	PS	PS	PM	PM
Z	NM	NS	PS	PB	PS	NS	NM
PS	PM	PM	PS	PS	PS	NM	NM
PM	Z	Z	NS	NS	NM	NB	NB
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

Tabel 11. Perencanaan Penyesuaian Kendali Fuzzy Kd

e\de	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z
NS	Z	NS	NM	NM	NS	NS	Z
Z	PM	NS	NS	PS	NS	NS	PM
PS	Z	NS	NS	NM	NM	NS	Z
PM	Z	NS	NM	NM	NB	NS	PS
PB	PS	NM	NB	NB	NB	NS	PS

4.5. Data Hasil Penelitian

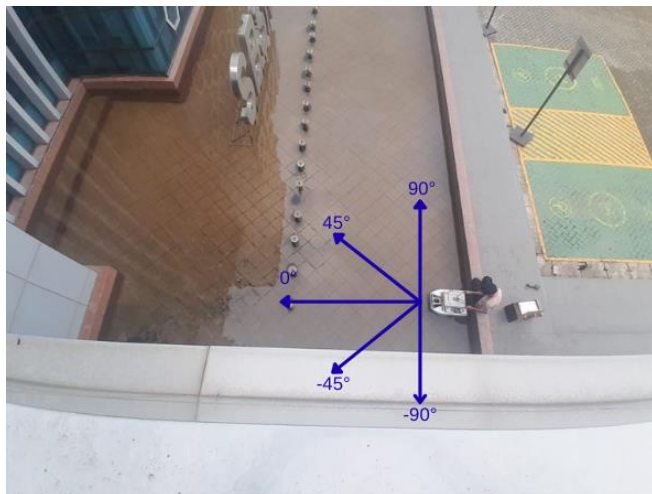
4.5.1 Pengujian Implementasi Sistem Kendali *Fuzzy Logic*

Tabel 12. Hasil Fuzzy Untuk Mendapatkan Kp, Ki, Kd

No	Data Input			Hasil Fuzzy		
	Index e/ed	Error	DeltaError	Kp	Ki	Kd
1	Z,Z	0	0	24,0	0,8	10,6
2	NB,PS	-25,1	2,5	26,6	0,6	2,7
3	NM,PB	-18,5	18,1	21,4	0,7	8,0
4	PS,PB	12,3	27,5	29,3	0,6	8,0
5	NM,Z	-23,2	-19,4	32,0	0,5	10,6

Berdasarkan data hasil pengujian yang tersaji pada tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa mekanisme Fuzzy-PID telah berhasil melakukan penyesuaian parameter Kp, Ki, dan Kd secara real-time mengikuti dinamika perubahan error dan delta error. Sistem menunjukkan respons adaptif yang sesuai dengan perancangan rule base untuk menentukan hasil output dengan index input yang berbeda.

4.5.2 Pengujian Stabilitas *Heading ASV*

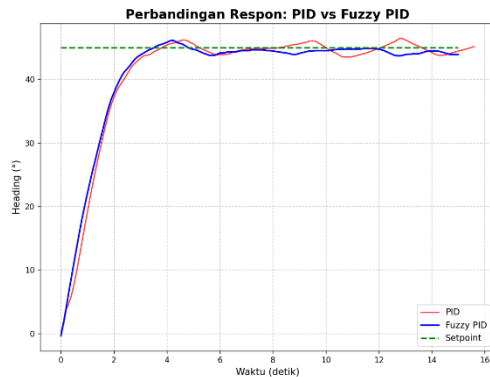


Gambar 16. Pengujian Stabilitas *Heading ASV*

Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan 2 kontrol berbeda yaitu PID dan *Fuzzy PID* untuk melihat respons pada tabel berikut. Pengujian pertama adalah stabilitas *heading(statis)* dan stabilitas *heading(forward)*, ASV letakkan dikolam dan diberikan sinyal input *setpoint heading* dan ASV akan mempertahankan *heading* saat diam ataupun bergerak maju, kemudian penulis melihat respon ASV dan mencatat perbandingan dari 2 kontrol yang digunakan. Berikut tabelnya :

Tabel 13. Hasil Pengujian Stabilitas *Heading (Statis)*

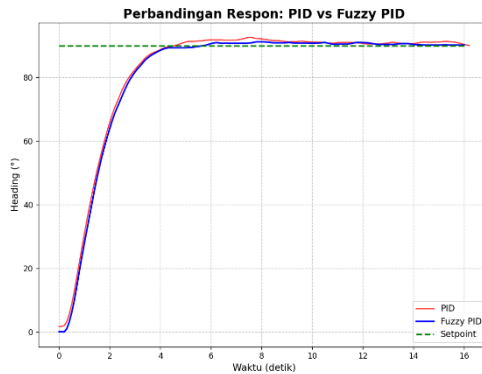
Hasil Pengujian Stabilitas Heading (Statis)							
Trial	Setpoint (°)	Parameter					
		PID			Fuzzy-PID		
		Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)	Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)
1	45	3,34	3,1	1,53	2,99	2,8	1,44
2		3,45	2,9	1,63	2,77	2,8	1,64
3		3,72	3,3	1,79	3,47	2,7	1,71
Rata-rata		3,50	3,10	1,65	3,08	2,77	1,60
1	90	1,96	3,6	0,85	1,35	3,6	0,80
2		1,27	3,6	0,74	1,66	3,6	0,73
3		1,71	3,6	0,82	1,45	3,4	0,86
Rata-rata		1,65	3,60	0,80	1,49	3,53	0,80
1	-45	2,98	2,5	1,54	3,26	2,8	1,74
2		5,65	3,7	1,69	3,01	2,4	1,70
3		3,16	2,6	1,42	3,47	2,4	1,45
Rata-rata		3,93	2,93	1,55	3,25	2,53	1,63



Gambar 17. Perbandingan Respons Stabilitas *Heading (Statis)*

Tabel 14. Hasil Pengujian Stabilitas Heading (Forward)

Hasil Pengujian Stabilitas Heading (Forward)							
Trial	Setpoint (°)	Parameter					
		PID			Fuzzy-PID		
		Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)	Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)
1	45	0,70	3,00	0,82	0,55	2,60	1,13
2		2,98	3,00	2,05	0,58	3,10	1,54
3		1,11	3,10	1,4	0,55	3,50	1,16
Rata-rata		1,60	3,03	1,42	0,56	3,07	1,28
1	90	1,52	3,70	1,09	1,47	3,30	0,94
2		3,01	3,40	1,48	1,40	3,50	0,85
3		1,83	3,70	1,39	1,54	3,60	1,04
Rata-rata		2,12	3,60	1,32	1,47	3,47	0,94
1	-45	2,89	3,40	1,72	2,56	3,20	1,74
2		2,70	3,00	1,48	2,38	3,40	1,67
3		2,04	3,40	1,47	0,13	3,30	1,28
Rata-rata		2,54	3,27	1,56	1,69	3,30	1,56



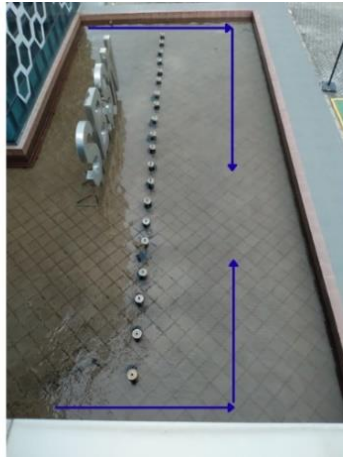
Gambar 18. Perbandingan Respons Stabilitas Heading (Forward)

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, parameter PID awal (*base parameters*) ditentukan secara spesifik untuk dua kondisi operasi yang berbeda. Pada kondisi diam (*statis*), konstanta diatur pada nilai $K_p = 45.0$, $K_i = 1.0$, dan $K_d = 40.0$. Sedangkan pada kondisi bergerak maju (*forward*), nilai konstanta disesuaikan menjadi $K_p = 24.0$, $K_i = 0.65$, dan $K_d = 8.0$ untuk menjaga kestabilan dinamis. Selanjutnya, algoritma *Fuzzy Logic* bekerja secara adaptif dengan memberikan nilai koreksi (*Gain Update*) terhadap konstanta dasar tersebut. Mekanisme penjumlahan ini memungkinkan parameter PID berubah secara *real-time* dalam rentang koreksi ± 8.0 untuk K_p dan K_d , serta ± 0.1 untuk K_i .

Berdasarkan hasil pengujian yang dirangkum pada **Tabel 13** (kondisi *statis*) dan **Tabel 14** (Kondisi *Forward*), terlihat bahwa implementasi metode kendali *Fuzzy-PID* secara umum memberikan performa yang lebih unggul dibandingkan dengan kontroler PID. Peningkatan performa yang paling signifikan terlihat pada kondisi *Forward* atau saat bergerak maju. Merujuk pada data Tabel 14, metode *Fuzzy-PID* mampu mereduksi nilai *overshoot* di seluruh titik uji. Sebagai contoh, pada *setpoint* 45° , *overshoot* berhasil ditekan dari 1,60% (PID) menjadi hanya 0,56% (*Fuzzy-PID*).

Namun dengan selisih *Settling Time* dan *Steady State Error* antara kedua metode relatif sama. Pada pengujian skema ini *Fuzzy-PID* lebih baik dalam meminimalisir *overshoot*. Perbandingan respons sistem statis dan forward terdapat pada **Lampiran A**.

4.5.3 Pengujian Respons Manuver *Heading* ASV

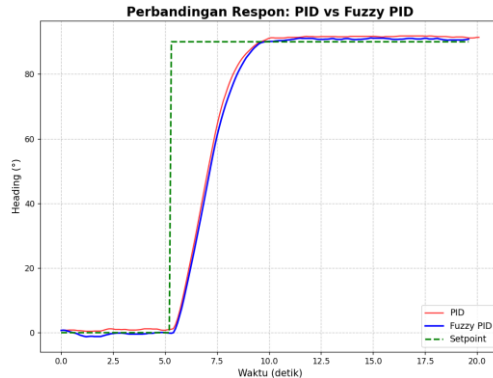


Gambar 19. Pengujian Manuver *Heading*

Pada pengujian ini, ASV dijalankan untuk bergerak maju dengan diberikan perubahan *setpoint* untuk bergerak lurus dan melakukan manuver, atau koreksi arah. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana sistem kendali mempertahankan *heading* saat bergerak, serta seberapa cepat dan adaptif merespons perubahan setpoint arah hadap.

Tabel 15. Hasil Pengujian Respons Manuver *Heading*

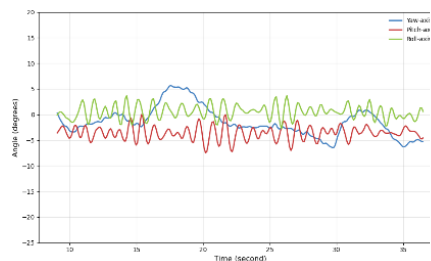
Hasil Pengujian Respons <i>Heading</i> (Manuver <i>Heading</i>)							
Trial	Setpoint (°)	Parameter					
		PID			Fuzzy-PID		
		Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)	Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)
1	0 ke 90	2,44	3,50	1,86	1,85	3,60	1,45
2		2,08	3,60	1,79	1,35	3,70	0,99
3		2,05	3,60	1,29	1,98	3,40	1,34
Rata-rata		2,19	3,57	1,65	1,73	3,57	1,26
1	0 ke -90	1,42	4,10	0,87	1,40	4,20	0,83
2		1,62	4,10	0,98	1,63	4,20	1,05
3		2,37	3,90	1,35	1,44	4,10	0,99
Rata-rata		1,80	4,03	1,07	1,49	4,17	0,96



Gambar 20. Perbandingan Respons Manuver Heading

Hasil pengujian yang termuat dalam **Tabel 15** menunjukkan karakteristik respon sistem saat melakukan belokan tajam. Pada manuver positif (0° ke 90°), metode *Fuzzy-PID* menunjukkan keunggulan performa dibandingkan PID. Penerapan *Fuzzy-PID* berhasil mereduksi *overshoot* dari $2,19\%$ menjadi $1,73\%$ dan menurunkan *steady state error* dari $1,65^\circ$ menjadi $1,26^\circ$, dengan waktu penstabilan (*settling time*) yang setara yakni $3,57$ detik.

Sementara itu, pada manuver negatif (0° ke -90°), PID mencatatkan waktu *settling* yang sedikit lebih cepat ($4,03$ detik berbanding $4,17$ detik), Namun *Fuzzy-PID* tetap unggul dalam nilai *overshoot* yang lebih rendah ($1,49\%$ berbanding $1,80\%$). Hal ini mengindikasikan, *Fuzzy-PID* mampu mencapai target sudut dengan lebih presisi. Perbandingan respons sistem manuver *heading* terdapat pada **Lampiran B**.

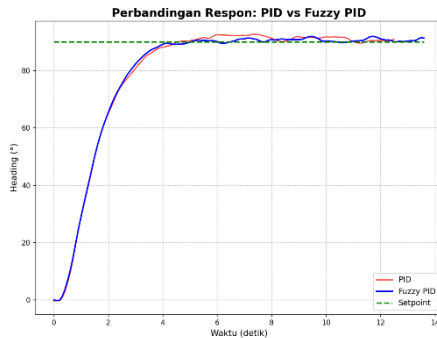


Gambar 21. Pengujian Gangguan Heading

Pengujian terakhir dilakukan pengujian koreksi arah dengan gangguan berupa gelombang air, ASV bergerak maju dengan diberikan input *setpoint*. Dilakukan juga pengukuran *roll*, *pitch* menggunakan sensor IMU untuk mengukur seberapa besar guncangan yang dihasilkan seperti pada **Gambar 20**.

Tabel 16. Hasil Pengujian Respons Gangguan Heading

Hasil Pengujian Respons Heading (Gangguan Heading)							
Trial	Setpoint (°)	Parameter					
		PID			Fuzzy-PID		
		Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)	Overshoot(%)	Settling Time(s)	Steady State Error(%)
1	45	4,91	2,90	1,98	3,83	2,60	1,59
2		4,78	3,20	1,83	3,46	2,50	1,8
3		4,51	2,70	2,02	3,24	3,00	1,4
Rata-rata		4,73	2,93	1,94	3,51	2,70	1,60
1	90	2,86	3,50	1,50	2,10	3,40	0,83
2		2,68	3,40	1,24	3,10	3,20	1,12
3		2,66	3,60	1,50	2,92	3,00	1,33
Rata-rata		2,73	3,50	1,41	2,71	3,20	1,09



Gambar 22. Perbandingan Respons Gangguan Heading

Hasil dari respon sistem terhadap gangguan tersebut dirangkum dalam **Tabel 16**. Berdasarkan data yang diperoleh, kontroler *Fuzzy-PID* secara umum menunjukkan performa yang stabil dibandingkan PID. Pada pengujian dengan target 45°, metode *Fuzzy-PID* terbukti mampu meredam efek gangguan lebih baik, ditandai dengan penurunan nilai *overshoot* dari 4,73% (PID) menjadi 3,51% (*Fuzzy-PID*), serta memperkecil *steady state error* menjadi 1,60%.

Meskipun pada pengujian *setpoint* 90° kedua kontroler menunjukkan kinerja yang relatif berimbang seperti nilai *overshoot*. Namun, kontroler *Fuzzy-PID* tetap mencatatkan waktu penstabilan (*settling time*) yang lebih cepat, yakni 3,20 detik dibandingkan 3,50 detik pada PID dan *steady state error* yang menurun menjadi 1%. Namun secara keseluruhan, kedua metode berhasil menjaga penyimpangan arah (*error*) tetap di bawah 1°, yang menegaskan kelayakan sistem kendali untuk beroperasi di lingkungan perairan bergelombang ringan. Perbandingan respons sistem gangguan heading terdapat pada **Lampiran C**.

4.6. Pembahasan

Berdasarkan serangkaian pengujian yang telah dilakukan, evaluasi kinerja sistem kendali *Autonomous Surface Vehicle* (ASV) dianalisis dari tiga aspek utama: respon adaptif PID, stabilitas *heading* pada berbagai kondisi operasi, dan ketahanan (*robustness*) terhadap gangguan eksternal. Pembahasan ini bertujuan untuk membedah korelasi antara metode kendali yang diterapkan dengan respon fisik.

4.6.1 Verifikasi Implementasi Adaptif Fuzzy-PID

Langkah awal analisis difokuskan pada validasi fungsi blok *Fuzzy Logic Controller* (FLC) sebagai koreksi parameter PID. Berdasarkan data **Tabel 12**, terbukti bahwa algoritma yang dirancang mampu menghasilkan keluaran parameter (K_p , K_i , K_d) yang bervariasi secara dinamis mengikuti perubahan kondisi *Error* dan *Delta Error*. Hal ini selaras dengan penelitian yang dilakukan J.Subur et al. (2023), dimana *Fuzz-PID* secara *realtime* menghasilkan nilai K_p , K_i , K_d secara adaptif.

Secara spesifik, verifikasi ini mengonfirmasi bahwa persamaan (8), (9), dan (10) bekerja sesuai rancangan. Sistem berhasil memberikan respon kontrol yang logis, validasi ini penting untuk memastikan bahwa perbaikan performa yang terjadi pada uji lapangan adalah benar-benar hasil dari kecerdasan algoritma.

4.6.2 Efektivitas Adaptasi *Gain* pada Kondisi Dinamis

Melalui penerapan *Fuzzy-PID*, fluktuasi parameter yang tervalidasi pada **sub-bab 4.6.1** terbukti efektif meredam fenomena osilasi yang kerap terjadi. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan drastis nilai *overshoot* dari 1,60% (PID) menjadi hanya 0,56% (*Fuzzy-PID*) pada uji jalan 45°. Seperti penelitian yang dilakukan Jinyu Han (2024) dimana pengendali *Fuzzy-PID* meningkatkan respons terhadap perubahan kondisi dan lebih baik dalam mengurangi *overshoot* serta melengkapi penelitian yang dilakukan Abdul et al. (2023), Radimas Putra et al. (2019) dan Sarmayanta et al. (2015), yang secara spesifik tidak membahas aspek kestabilan *heading* pada pengendali Fuzzy.

Analisis mendalam menunjukkan bahwa penurunan *overshoot* ini bukan hanya karena penurunan K_p saat mendekati *setpoint*, melainkan juga mekanisme “Pengereman” juga berperan. Logika Fuzzy menemukan laju perubahan *error* (derivative) yang besar saat kapal mendekati *setpoint* dengan kecepatan sudut tinggi, dan secara otomatis meningkatkan parameter K_d (*damping*). Peningkatan gaya redaman ini mengurangi momentum sisa kapal sesaat sebelum *setpoint*, memungkinkan kapal berhenti di sudut yang diinginkan tanpa meluncur (*overshoot*) terlalu jauh. Jika tidak ada mekanisme adaptif ini, inersia gerak kapal akan mendominasi dan mengakibatkan osilasi di sekitar *setpoint*.

4.6.3 Analisis Manuver dan Ketahanan Gangguan

Konsistensi kinerja sistem diuji lebih lanjut melalui manuver ekstrem dan simulasi gangguan gelombang. Pada kedua skenario ini, *Fuzzy-PID* konsisten memberikan stabilitas yang lebih baik. Meskipun waktu respon (*settling time*) relatif setara dengan PID pada *manuver heading*, metode *Fuzzy-PID* unggul dalam aspek gerak dan efisiensi.

Nilai Integral (K_i) biasanya dikecilkan untuk mencegah ketidakstabilan dalam metode PID. Tetapi dalam desain Fuzzy yang digunakan, ada aturan logika (*Rule Base*) yang meningkatkan bobot K_i dan K_d secara otomatis dan signifikan hanya ketika *error* mendekati nol (kondisi *Steady State*). Efek "Jangkar" dihasilkan oleh mekanisme ini. Menurut data IMU, saat terjadi guncangan ombak yang mencoba membelokkan kapal, sistem langsung merespon dengan kekakuan tinggi (*stiffness*) untuk menghindari gangguan. Namun, sistem kembali menjadi tidak kaku saat kapal harus melakukan manuver belokan tajam. Hal ini menunjukkan bahwa koreksi adaptif sistem dapat secara efektif mengkompensasi gangguan eksternal tanpa mengorbankan kestabilan arah saat bermanuver.

Hembusan angin merupakan faktor lain yang mempengaruhi respons sistem selama pengujian lapangan selain gangguan gelombang. Karena desain fisik ASV memiliki struktur bagian atas yang menonjol di atas permukaan air (*superstructure*), badan kapal mengalami efek layar, yang menyebabkan gaya seret aerodinamika. Gaya dorong atau drift, yang mencoba membelokkan haluan kapal dari garis lurus, menunjukkan pengaruh variabel kecepatan angin, meskipun tidak ada pengukuran kuantitatif yang dilakukan dalam penelitian ini.

4.6.4 Pengaruh Non-Linearitas Aktuator dan *Deadzone Thruster*

Faktor krusial lain yang mempengaruhi hasil pengujian namun tidak terekspos langsung dalam grafik respon adalah batasan fisik dari sistem propulsi. Motor *thruster* yang digunakan memiliki karakteristik non-linear berupa **Zona Mati (*Deadzone*) Mekanik**, di mana sinyal PWM di bawah ambang batas tertentu tidak menghasilkan gaya dorong yang efektif.

Fenomena ini memberikan tantangan pada eliminasi *Steady State Error* yang sangat kecil (mikro). Meskipun algoritma kendali telah menghitung nilai koreksi yang presisi, jika output PWM yang dihasilkan jatuh ke dalam area *deadzone*, maka aktuator tidak akan merespon. Solusi yang diterapkan dalam penelitian ini adalah dengan membatasi output minimal PWM agar selalu berada di area kerja aktif motor. Hal ini menjelaskan mengapa pada beberapa kondisi tertentu masih terdapat sisa *error* statis yang sulit dihilangkan sepenuhnya ($< 1.0^\circ$). Selain itu, adanya batasan fisik seperti mekanik *thruster* yang tidak dapat dioptimalisasi lagi hanya melalui perangkat lunak.

Bab 5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Terdapat kesimpulan yang dapat ditarik dari perancangan dan pengujian sistem kendali *Autonomous Surface Vehicle* (ASV) yang telah dilakukan, sebagai berikut :

1. **Implementasi Kendali Adaptif**, Sistem kendali adaptif berbasis *Fuzzy Logic Controller* (FLC) berhasil diterapkan pada mikrokontroler ASV untuk menala parameter PID secara *real-time*. Hasil pengujian validasi sistem dengan 5 kondisi input *Error* dan *Delta Error* yang berbeda menunjukkan bahwa blok *Fuzzy Inference System* (FIS) dapat secara dinamis memetakan input *Error* dan *Delta Error* menjadi nilai koreksi parameter K_p , K_i , dan K_d sesuai dengan *rule base* yang dirancang.
2. **Pengujian Stabilitas Arah Hadap**, Menunjukkan bahwa integrasi metode *Fuzzy-PID* memberikan kontribusi signifikan terhadap stabilitas arah ASV, terutama pada kondisi *forward*. Dibandingkan dengan kontroler PID, metode *Fuzzy-PID* mampu mereduksi *overshoot*. Dibuktikan berdasarkan data uji *heading* 45°, penerapan *Fuzzy-PID* mampu mereduksi *overshoot* rata-rata dari 1,60% (pada PID) menjadi 0,56%. Begitupun dengan data uji *heading* 90° dan -45° yang mengurangi *overshoot* hingga 0,50%.
3. **Respons Adaptif Terhadap Manuver dan Ketahanan Gangguan**, Dalam kondisi manuver dan gangguan eksternal berupa gelombang ringan, sistem secara adaptif mampu meredam error *overshoot*. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa pengendali *Fuzzy-PID* mampu mengembalikan sudut *heading* kapal ke titik *setpoint* dengan lebih presisi saat terjadi penyimpangan.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, berikut adalah saran untuk pengembangan sistem selanjutnya:

1. **Optimasi Membership Function**, Pada penelitian ini, parameter fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy ditentukan berdasarkan eksperimen dan trial error, perlu metode optimasi otomatis
2. **Pengembangan ke Navigasi Sistem**, Saat ini sistem hanya berfokus pada kontrol *motion heading*, selanjutnya dapat dikembangkan dengan sistem navigasi otonom.
3. **Wahana Uji Coba**, Perluasan area uji coba dan pengujian skenario yang lebih variatif untuk memvalidasi ketahanan sistem kendali.

Daftar Pustaka

- [1] "View of Survei Bathimetri di Perairan Dangkal Menggunakan Wahana USV (Unmanned Surface Vehicle) Studi Kasus Sungai Ciliwung." Accessed: Jul. 17, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/imagi/article/view/7478/4645>
- [2] M. H. A. Majid and M. R. Arshad, "A Fuzzy Self-Adaptive PID Tracking Control of Autonomous Surface Vehicle," *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, pp. 458–463, Nov. 2015, doi: 10.1109/iccscce.2015.7482229.
- [3] C. R. Sonnenburg and C. A. Woolsey, "Modeling, identification, and control of an unmanned surface vehicle," *J Field Robot*, vol. 30, no. 3, pp. 371–398, May 2013, doi: 10.1002/rob.21452.
- [4] A. I. Ahmada, W. Dan, and E. Handoyo, "IMPLEMENTASI PENGENDALI PID UNTUK NAVIGASI AUTONOMOUS BERBASIS GLOBAL POSITIONING SYSTEM PADA PURWARUPA AUTONOMOUS SURFACE VEHICLE." [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>
- [5] A. Syafiq, A. Wiyono, M. Syariffuddien Zuhrie, and L. Rakhmawati, "Pemodelan Sistem Kontrol Stabilizer PWM Motor Thruster Menggunakan Electric Speed Controller Pada Prototipe Autonomous Tourism Surface Vessel Berbasis PID 237 Pemodelan Sistem Kontrol Stabilizer PWM Motor Thruster Menggunakan Electric Speed Controller Pada Prototipe Autonomous Tourism Surface Vessel Berbasis PID."
- [6] F. R. Wisnu Aribowo Adian Fatchur Iwan Setiawan, "Robot Mobile Penjejak Arah Cahaya Dengan Kendali Logika Fuzzy," Semarang, Sep. 2008.
- [7] Husnawati, "Penerapan Metode Fuzzy Sugeno Sebagai Sistem Navigasi Robot Menggunakan Mikrokontroler Arduino dan Sensor Ultrasonik," *JURNAL ILMIAH INFORMATIKA GLOBAL*, vol. 09, pp. 40–48, Jul. 2018.
- [8] sarmayanta Sembiring, R. Pasarella, H. Setiawan, and Y. Prasetya, "Implementasi Metode Fuzzy Sugeno Pada Robot Kapal Penghindar Rintangan," *Annual Research Seminar*, pp. 97–100, 2015.
- [9] B. I. Setia STM Tunas Bangsa Bandar Lampung bsetia, "Penerapan Logika Fuzzy pada Sistem Cerdas," 2019.
- [10] "Kontes Kapal Indonesia (KKI) Tahun 2025 – Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia." Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://kemdiktisaintek.go.id/pengumuman/pendidikan-tinggi/kontes-kapal-indonesia-kki-tahun-2025/>
- [11] Y. Wu, T. Wang, and S. Liu, "A Review of Path Planning Methods for Marine Autonomous Surface Vehicles," *Journal of Marine Science and*

- Engineering* 2024, Vol. 12, Page 833, vol. 12, no. 5, p. 833, May 2024, doi: 10.3390/JMSE12050833.
- [12] P. Gogendeau *et al.*, "An open-source Autonomous Surface Vehicle for Acoustic Tracking, Bathymetric and Photogrammetric Surveys," *Ocean Engineering*, Jun. 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2406.18760>
 - [13] G. Wu, D. Li, H. Ding, D. Shi, and B. Han, "An overview of developments and challenges for unmanned surface vehicle autonomous berthing," *Complex and Intelligent Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 981–1003, Feb. 2024, doi: 10.1007/S40747-023-01196-Z/TABLES/3.
 - [14] I. Sobirin, J. Endrasmono, D. P. Riananda, P. Asri, M. A. Jami'in, and I. Munadhif, "IMPLEMENTASI KONTROL PID ZIEGLER – NICHOLS UNTUK PENGENDALIAN PENYELAMAN PADA ROBOT BAWAH AIR OTONOM HYDROSHIPS," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 11, no. 2, pp. 409–420, Jul. 2024, doi: 10.33795/elkolind.v11i2.5344.
 - [15] C. Zhu, "An Intelligent PID Parameters' Adjustment Algorithm for Control System," *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, vol. 9, no. 5, pp. 153–162, May 2016, doi: 10.14257/IJFGCN.2016.9.5.15.
 - [16] Erwin Irmawan, Tri Kuntoro Priyambodo, and Edi Sofyan, "SISTEM KENDALI ADAPTIF NEURO-FUZZY PID PADA KAPAL KATAMARAN TANPA AWAK," *Jurnal Teknik STTKD*, vol. 3, Dec. 2016.
 - [17] J. Subur, S. Suryadhi, and E. Arohman, "Penerapan Metode Fuzzy Logic-PID Sebagai Kontrol Gerak Robot Berkaki Enam (Hexapod)," *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, vol. 6, pp. 98–108, Oct. 2023, doi: 10.30595/pspfs.v6i.858.
 - [18] P. B. Khoi and N. Van Toan, "APPLICATION OF FUZZY LOGIC FOR CONTROLLING MECHANISM OF RELATIVE MANIPULATION ROBOT (MRM ROBOT)," *Vietnam J Sci Technol*, vol. 54, no. 3, p. 386, Jun. 2016, doi: 10.15625/0866-708X/54/3/7333.
 - [19] V. Stoian and M. Ivanescu, "Robot Control by Fuzzy Logic," *Frontiers in Robotics, Automation and Control*, Oct. 2008, doi: 10.5772/6329.
 - [20] A. H. Abyan Faruq, J. Endrasmono, I. Rachman, A. Khumaidi, R. Yudha Adhitya, and Z. M. Ahmad Putra, "Kontrol Kestabilan Kapal Autonomous Submarine Surface Vehicle Dengan Metode Fuzzy Logic," *Infotekmesin*, vol. 14, no. 2, pp. 327–336, Jul. 2023, doi: 10.35970/INFOTEKMESIN.V14I2.1920.
 - [21] K. Agustianto and D. A. Dwijayanti, "Autonomous Surface Vehicle Controlling Menggunakan Kinect untuk Observasi Terumbu Karang," *Jurnal Teknologi Informasi dan Terapan*, vol. 6, no. 2, pp. 85–92, Dec. 2019, doi: 10.25047/JTIT.V6I2.119.

- [22] M. D. L. Radimas Putra, M. Rivai, and A. N. Irfansyah, "Unmanned Surface Vehicle Navigation Based on Gas Sensors and Fuzzy Logic Control to Localize Gas Source," *J Phys Conf Ser*, vol. 1201, no. 1, May 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1201/1/012001.
- [23] J. Han, "Design and Application of Fuzzy PID Controller Based on MATLAB," *Journal of Engineering Research and Reports*, vol. 26, no. 11, pp. 179–189, Nov. 2024, doi: 10.9734/JERR/2024/V26I111323.
- [24] A. I. Al-Odienat and A. A. Al-Lawama, "The Advantages of PID Fuzzy Controllers Over The Conventional Types," *Am J Appl Sci*, vol. 5, no. 6, pp. 653–658, 2008.

Biodata

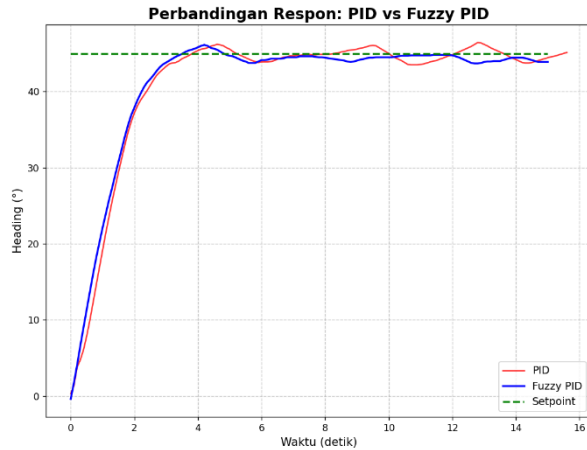


Nama : Vafin Julianba
TTL : Batam, 01 Juni 2003
Agama : Islam
Alamat : Tiban Lama, RT03/RW12/No.03/Blok
A03
Email : vafinjulanba@gmail.com
Riwayat Pendidikan :
SMA/SMK : SMK NEGERI 4 BATAM
SMP : SMP NEGERI 25 BATAM

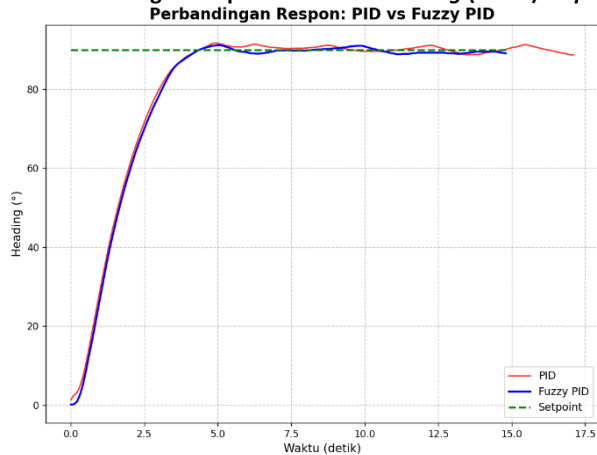
Lampiran

Lampiran A. Perbandingan Respon Sistem Stabilitas *Heading*

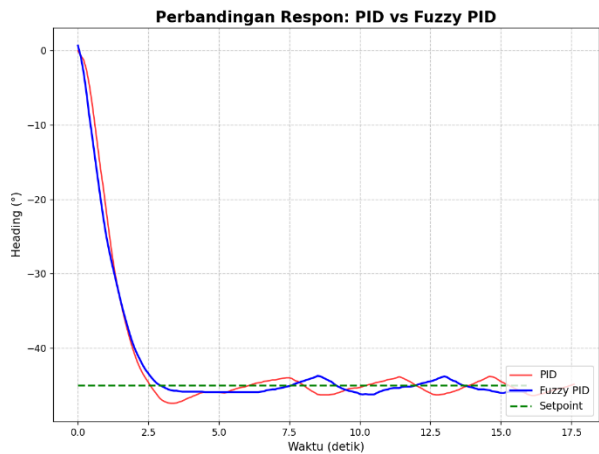
Lampiran 1. Perbandingan Respons Stabilitas *Heading* (Statis) Setpoint 45



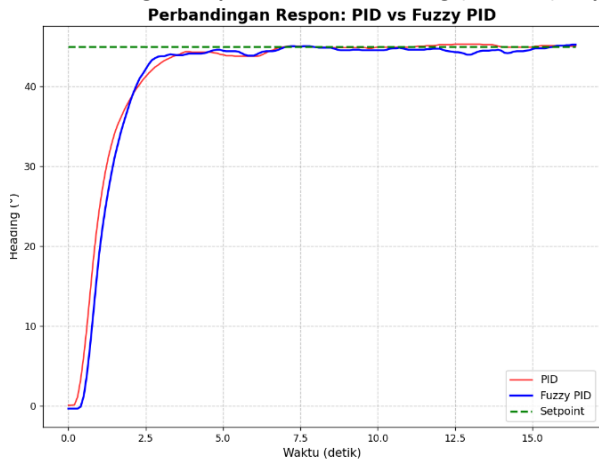
Lampiran 2. Perbandingan Respons Stabilitas *Heading* (Statis) Setpoint 90



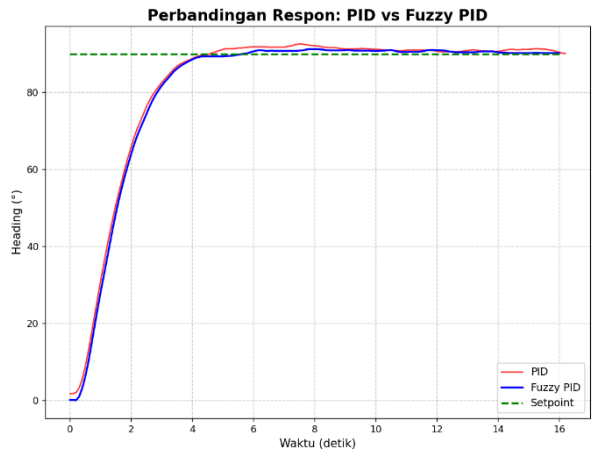
Lampiran 3. Perbandingan Respons Stabilitas Heading (Static) Setpoint -45



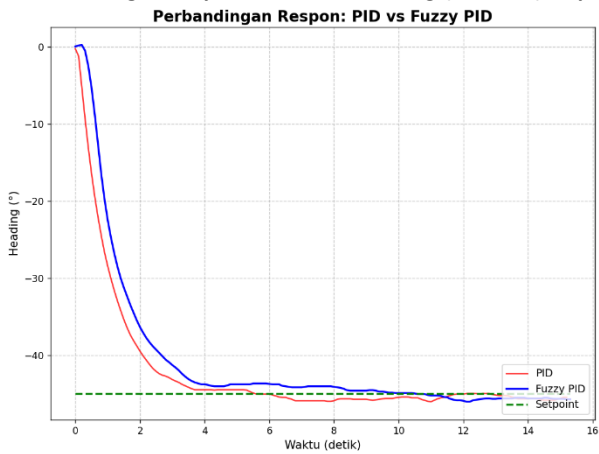
Lampiran 4. Perbandingan Respons Stabilitas Heading (Forward) Setpoint 45



Lampiran 5. Perbandingan Respons Stabilitas *Heading (Forward)* Setpoint 90

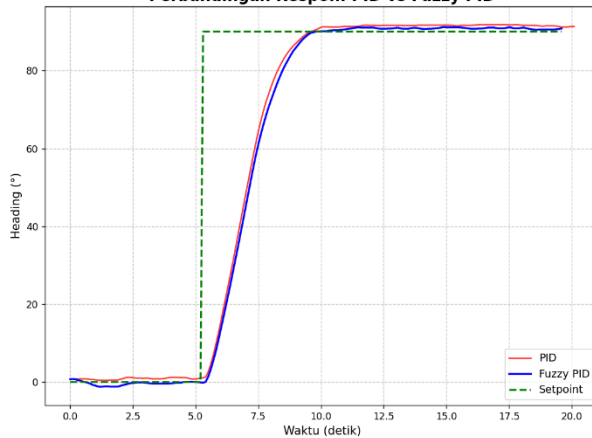


Lampiran 6. Perbandingan Respons Stabilitas *Heading (Forward)* Setpoint -45

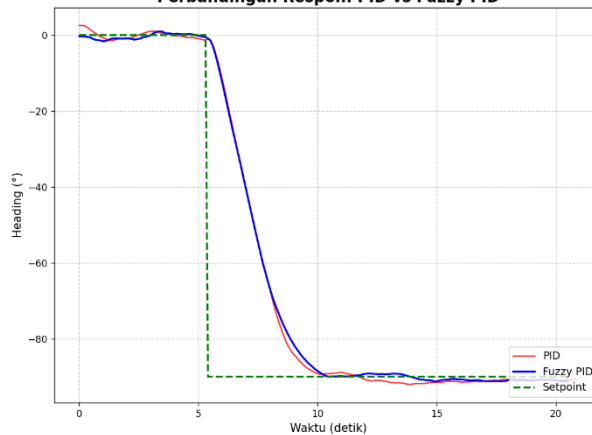


Lampiran B. Perbandingan Respon Sistem Manuver *Heading*

Lampiran 7. Perbandingan Respons Manuver *Heading Setpoint 0 ke 90*
Perbandingan Respon: PID vs Fuzzy PID

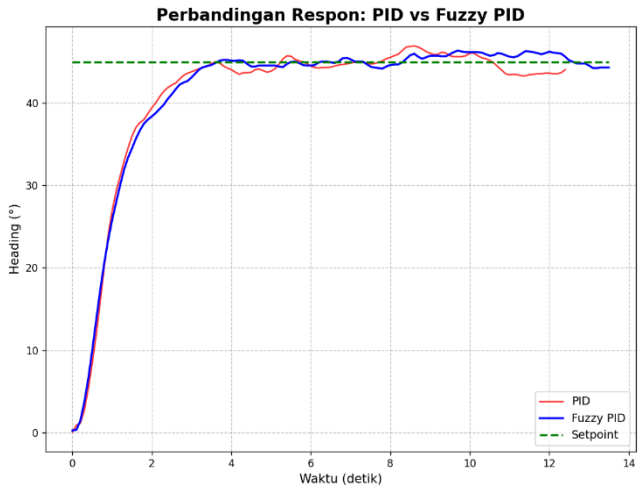


Lampiran 8. Perbandingan Respons Manuver *Heading Setpoint 0 ke -90*
Perbandingan Respon: PID vs Fuzzy PID



Lampiran C. Perbandingan Respon Sistem Gangguan Heading

Lampiran 9. Perbandingan Respons Gangguan Heading Setpoint 45



Lampiran 10. Perbandingan Respons Gangguan Heading Setpoint 90

